

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO MECÁNICO

TEMA:
DISEÑO ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SOPORTE
MECÁNICO CON DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA
POSICIONAMIENTO PERPENDICULAR A LA LUZ DE UN PANEL
FOTOVOLTAICO DE 100 W

AUTOR:
ROBINSON ALBERTO TAPIA CRUZ

TUTOR:
CARLOS IVÁN MALDONADO DÁVILA

Quito, julio del 2018

CESIÓN DE DERECHOS DEL AUTOR

Yo, Robinson Alberto Tapia Cruz con documento de identificación N° 1713833075, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “DISEÑO ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SOPORTE MECÁNICO CON DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA POSICIONAMIENTO PERPENDICULAR A LA LUZ DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE 100 W”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Robinson Alberto Tapia Cruz

C.I. 1713833075

Quito, julio del 2018

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “DISEÑO ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SOPORTE MECÁNICO CON DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA POSICIONAMIENTO PERPENDICULAR A LA LUZ DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE 100 W” realizado por Robinson Alberto Tapia Cruz, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2018



Carlos Iván Maldonado Dávila

C.I. 1711156073

DEDICATORIA

A Dios y a mi madre por su ejemplo de responsabilidad y abnegación porque fueron puerto en días de tormenta, porque fueron faro en noches oscuras, por la paciencia y las palabras de aliento brindadas. Y sobre todo, porque siempre han sido amor cada día de mi vida.

Robinson Alberto

AGRADECIMIENTO

Por la amistad y el apoyo brindado para la culminación con éxito de mi trabajo final de titulación. Mi más sincero reconocimiento a las personas que lo hicieron posible, Ingeniero Maldonado Carlos y Doctora Lucía Toro.

A la Universidad Politécnica Salesiana por haberme preparado integralmente, dándome la oportunidad de servir con dedicación a nuestra Patria.

A mis amigos y compañeros que siempre me apoyaron.

Robinson Tapia

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DEL AUTOR	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE	v
GLOSARIO.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	xv
ANTECEDENTES.....	1
CAPÍTULO I.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 Sistema fotovoltaico.....	3
1.2. Componentes de un sistema fotovoltaico.....	3
1.2.1. Paneles fotovoltaicos.....	3
1.3. Regulador de carga.....	7
1.4. Baterías.....	7
1.5. Sensores de luz.....	7
1.6. Motores de corriente continua.....	10
1.7. Seguidores solares	18
1.8. Tipos de seguimiento solar.....	19
CAPÍTULO II	21
SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA A SER CONSTRUIDA.....	21
2.1. Metodología para la obtención de la mejor alternativa	21
2.2. Requerimientos del sistema.....	21
2.2.1. Requisitos de funcionalidad	21
2.2.2. Características técnicas	21
2.2.3. Características económicas	22
2.2.4. Características operacionales	22
2.3. Parámetros a ser evaluados	22
2.3.1. Exactitud en su posicionamiento (valoración intrínseca).....	22
2.3.2. Bloqueo del posicionamiento (valoración intrínseca).....	23

2.3.3. Bajo consumo de potencia (valoración no intrínseca)	23
2.3.4. Facilidad de fabricación (valoración intrínseca)	23
2.3.5. Facilidad de montaje (valoración no intrínseca)	23
2.3.6. Facilidad de mantenimiento (valoración no intrínseca)	23
2.3.7. Bajo Costo (valoración no intrínseca)	24
2.3.8. Durable en el tiempo (valoración intrínseca)	24
2.4. Presentación de alternativas	24
2.5. Desarrollo de la alternativa 1	24
2.5.1. Seguidor solar con transmisión de poleas y cables	24
2.5.2. Funcionalidad	26
2.6. Desarrollo de la alternativa 2	27
2.6.1. Seguidor solar con transmisión por tornillo sinfín y corona	27
2.6.2. Funcionalidad	29
2.7. Desarrollo de la alternativa 3	29
2.7.1. Seguidor solar con transmisión por brazo balancín	29
2.7.2. Funcionalidad	31
2.8. Evaluación de alternativas	31
CAPÍTULO III	33
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA	33
3.1. Dimensionamiento de los elementos	33
3.2. Determinación de las fuerzas que actúan en el sistema	34
3.2.1. Fuerza del viento	34
3.2.2. Fuerza producida por el panel FV	37
3.2.3. Fuerza producto del mantenimiento	37
3.2.4. Fuerza producida por el peso de la estructura	37
3.3. Diseño de estructura base de panel FV	38
3.4. Diseño de brazos para sujeción de la base del panel	46
3.5. Diseño del eje de giro horizontal	52
3.6. Diseño de estructura tipo U	56
3.7. Diseño de columna base trípode	62
3.8. Selección del rodamiento giro rotacional, plano (X-Y)	68
3.9. Diseño de transmisiones	69
3.10. Control del movimiento	77

3.10.1. Instalación y conexión del seguidor solar	78
3.11. Costos.....	81
CAPÍTULO IV	84
RESULTADOS.....	84
4.1. Pruebas	84
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFIA.....	91
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Sistema fotovoltaico	3
Fig. 2. Efecto fotovoltaico.....	4
Fig. 3. Panel mono cristalino y celdas mono cristalinas	5
Fig. 4. Panel poli cristalino	6
Fig. 5. Panel de capa fina	6
Fig. 6. Sensibilidad de los sensores LDR.....	8
Fig. 7. Sensores LDR	8
Fig. 8. Curva de Resistencia vs. Luminosidad	9
Fig. 9. Piranómetro.....	10
Fig. 10. Motor paso a paso (PAP)	11
Fig. 11. Motor de corriente continua.....	11
Fig. 12. Motor reductor 12 Vcc.....	12
Fig. 13. Mecanismo de tornillo sinfín y corona	14
Fig. 14. Tren de engranajes dobles de ejes paralelos	15
Fig. 15. Estructura de soporte tipo carrusel.....	17
Fig. 16. Estructura tipo mono poste	17
Fig. 17. Seguimiento del sol en el eje azimut	18
Fig. 18. Seguimiento del sol en dos ejes	19
Fig. 19. Seguidor Solar tipo mono poste con transmisión de poleas y cables.	25
Fig. 20. Seguidor solar tipo mono poste con tronillo sinfín y corona.....	27
Fig. 21. Seguidor solar con transmisión por brazo balancín	29
Fig. 22. Alternativa 2	32
Fig. 23. Fuerza del viento.....	34
Fig. 24. Estructura Base de Panel.....	38
Fig. 25. Fuerza aplicada	39
Fig. 26. Análisis de cargas	39
Fig. 27. Momento flector máximo	40
Fig. 28. Geometría cargada y cargas asignadas	41
Fig. 29. Simulación realizada análisis de secciones.....	41
Fig. 30. Resultados obtenidos diagramas de Momento y Corte.....	42
Fig. 31. Diagrama de Momento, Corte y Deflexión	42
Fig. 32. Tabla de perfiles rectangulares de acero inoxidable	44

Fig. 33. Estructura base para sujetar panel FV	45
Fig. 34. Brazos tipo escuadra	46
Fig. 35. Fuerzas aplicadas	47
Fig. 36. Análisis de cargas	47
Fig. 37. Momento flector máximo	48
Fig. 38. Geometría cargada y cargas asignadas	49
Fig. 39. Simulación realizada del análisis de sección	49
Fig. 40. Resultados obtenidos de Momento y Corte	50
Fig. 41. Diagrama de Momento, Corte y Deflexión	50
Fig. 42. Tabla de perfiles tipo T	51
Fig. 43. Brazos para la sujeción de la estructura del panel FV	52
Fig. 44. Eje de giro sentido Latitud.....	53
Fig. 45. Análisis de cargas	53
Fig. 46. Diagrama de momento y corte.....	54
Fig. 47. Geometría cargada y cargas asignadas	54
Fig. 48. Diagrama de Momento, Corte y Deflexión	55
Fig. 49. Eje de giro horizontal.....	56
Fig. 50. Estructura tipo U.....	57
Fig. 51. Fuerza total aplicada	57
Fig. 52. Análisis de cargas	58
Fig. 53. Diagrama de Corte y Momento flector	58
Fig. 54. Geometría cargada y cargas asignadas	59
Fig. 55. Simulación realizada análisis de secciones.....	59
Fig. 56. Resultados obtenidos diagramas de Momento y Corte.....	60
Fig. 57. Diagrama de Momento, Corte y Deflexión	60
Fig. 58. Tabla de perfiles rectangulares de acero inoxidable	61
Fig. 59. Estructura tipo U.....	62
Fig. 60. Trípode.....	63
Fig. 61. Fuerzas aplicadas	64
Fig. 62. Momento flector máximo	64
Fig. 63. Geometría cargada y cargas asignadas	65
Fig. 64. Simulación realizada del análisis de sección	65
Fig. 65. Resultados obtenidos de Momento y Corte	66

Fig. 66. Tabla de perfil tipo tubo redondo	66
Fig. 67. Columna base tipo trípode	68
Fig. 68. Partes de un rodamiento cónico	68
Fig. 69. Tabla de rodamientos cónicos.....	69
Fig. 70. Motor reductor de 12Vcc.....	71
Fig. 71. Gráfico de engranes	71
Fig. 72. Tren de engranajes de ejes paralelos.....	72
Fig. 73. Transmisión eje altitud.....	73
Fig. 74. Transmisión de tornillo sinfín y corona.....	75
Fig. 75. Tensión de Von Mises	76
Fig. 76. Desplazamiento en el eje X	76
Fig. 77. Factor de seguridad.....	77
Fig. 78. Par giratorio (articulación de pasador).....	77
Fig. 79. Grados de libertad del mecanismo.....	78
Fig. 80. Circuito de Control	79
Fig. 81. Módulo de potencia	80
Fig. 82. Módulo de control.....	80
Fig. 83. Instalación de sistema de control	81
Fig. 84. Variación de voltaje	85
Fig. 85. Variación de Voltaje Panel Fijo.....	86

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ponderación de parámetros	22
Tabla 2. Listado de componentes	25
Tabla 3. Ficha técnica	26
Tabla 4. Listado de componentes	27
Tabla 5. Ficha técnica	28
Tabla 6. Listado de componentes	29
Tabla 7. Ficha técnica	30
Tabla 8. Evaluación de alternativas	32
Tabla 9. Características físicas de los elementos	33
Tabla 10. Coeficiente de forma C_f	35
Tabla 11. Coeficiente de corrección C_e	36
Tabla 12. Factor de seguridad y circunstancias en las cuales se usan	43
Tabla 13. Tren de engranajes de ejes paralelos	72
Tabla 14. Costos del proyecto	82
Tabla 15. Valores de voltaje entregados por el panel fotovoltaico con seguidor	84
Tabla 16. Valores de voltaje entregados por el panel fotovoltaico fijo a 40° de inclinación	86
Tabla 17. Valores de voltaje de panel fijo y con sistema de seguimiento	87

GLOSARIO

- **Ángulo azimutal:** Mide la magnitud de cuanto se traslada el sol con respecto al sur [5].
- **Ángulo cenital:** Es considerado el complemento de la altura solar, es la magnitud que le falta al sol para estar totalmente vertical con respecto al observador [5].
- **Celda fotovoltaica:** Elemento que transforma la luz solar en energía eléctrica, por el efecto fotovoltaico [1].
- **Energías alternativas:** Son las que pueden sustituir a la energía convencional y no implican impactos negativos en el medio ambiente [3].
- **Efecto fotovoltaico:** Es la producción de una corriente eléctrica entre dos materiales semiconductores que están en contacto, y son expuestos a la radiación solar [2].
- **Energía limpia:** Se considera a una energía limpia cuando su utilización no tiene riesgos potenciales y supone un nulo o escaso impacto ambiental [3].
- **Energía renovable:** Son consideradas como fuente de energía inagotable y suponen un nulo o escaso impacto ambiental [4].
- **Intrínseco.-** Es cuando una alternativa puede ser valorada sin necesidad de compararse con otras alternativas [7].
- **Módulo o panel fotovoltaico:** Conjunto de celdas solares interconectadas dentro de una unidad sellada [2].
- **No intrínseco.-** Es cuando una alternativa para ser valorada necesita compararse con otras alternativas [7].
- **Sensores LDR:** Son sensores fotoeléctricos o dispositivos electrónicos que responden al cambio de la intensidad de la luz [6].

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño de un prototipo de seguidor solar con dos grados de libertad, para mejorar la captación de la radiación solar que incide sobre un panel fotovoltaico de 100 Watts. Para el desarrollo de este diseño se realizó un estudio referente a los tipos de seguidores solares y de las características de los paneles fotovoltaicos existentes en el mercado y conocer así, la ganancia extra que se podía obtener de un panel fotovoltaico al estar expuesto el mayor tiempo posible al lugar de máxima radiación solar.

En este prototipo de seguidor solar se utilizaron sensores LDR, los mismos que varían su resistencia frente al cambio de luminosidad detectada en el ambiente, la señal emitida por los sensores es capturada y procesada por un módulo de control, el cual acciona los actuadores, permitiendo que el sistema gire y posicione el panel al lugar donde exista la mayor cantidad de luz.

Finalmente, se realizaron pruebas de funcionamiento, permitiendo obtener los datos de voltaje, entregados por el panel fotovoltaico de 100 W, acoplado al prototipo de seguidor solar, con estos datos se elaboraron tablas en Excel y gráficas de la curva de voltaje, en las que se evidenció una ganancia de energía.

Palabras claves: panel fotovoltaico, seguidor solar, posicionamiento.

ABSTRACT

This work presents the design of a prototype solar tracker with two degrees of freedom, to improve the uptake of solar radiation that falls on a photovoltaic panel of 100 Watts. In order to carry out this design, a study was made regarding the types of solar trackers and the characteristics of the photovoltaic panels existing in the market and thus, the extra gain that could be obtained from a photovoltaic panel when exposed as long as possible to the place of maximum solar radiation.

In this prototype of solar tracker, were used LDR sensors, the same ones that vary their resistance to the change of luminosity detected in the environment, this signal emitted by the sensors is captured and processed by a control module; which turns on the actuators, allowing the system to rotate and position the panel to the place where there is the greatest amount of light.

Finally performance tests were performed, allowing to obtain the voltage data, delivered by the 100 W photovoltaic panel coupled to the solar tracker prototype, with these data tables were made in Excel and graphs of the voltage curve which showed an energy gain.

Keywords: photovoltaic panel, solar tracker, positioning.

INTRODUCCIÓN

El mundo se beneficia de diferentes fuentes de energía divididas en dos grupos: las renovables y las no renovables, dentro de las no renovables se encuentran las energías producidas por combustibles fósiles, como su nombre lo indica estas fuentes de energía se agotan y no pueden ser sustituidas de manera natural, lo que constituye un problema en el tiempo ya que podrían dejar de existir, a diferencia de la energía solar, eólica, hidroeléctrica, mareomotriz, biocarburante, cuya sustentabilidad está garantizada y se renuevan de forma natural [3]. El presente proyecto ha sido desarrollado en cuatro capítulos que se indican a continuación:

Capítulo I: Marco teórico, aquí se detalla cada una de las partes que componen un sistema fotovoltaico, los tipos de seguidores solares existentes en el mercado y los métodos de control utilizados para realizar su posicionamiento.

Capítulo II: Selección de la alternativa a ser construida, aquí se define la metodología para la obtención de la mejor alternativa, los requerimientos de funcionalidad del sistema y se plantean tres alternativas que serán evaluadas de acuerdo a los requerimientos de funcionalidad.

Capítulo III: Diseño y construcción del sistema, aquí se encuentra el dimensionamiento de cada elemento que forma el prototipo, se determina las fuerzas que actúan en el sistema, el diseño y simulación de cada uno de los elementos estructurales y transmisiones mecánicas del prototipo, diseño del módulo de control y construcción del prototipo de soporte mecánico.

Capítulo IV: Resultados, aquí se encuentran las pruebas en condiciones reales de trabajo, se obtienen datos y curvas de variación de voltaje, conclusiones y recomendaciones.

ANTECEDENTES

El uso de energías renovables en esta última década ha estado en constante crecimiento, debido, entre otras cosas, a la protección del ambiente. Todas estas energías no contaminan y, en muchos casos, pueden ser usadas para producir otro tipo de energía, como la energía eléctrica.

La electricidad generada con la incidencia de radiación solar en paneles fotovoltaicos es usada en lugares de difícil acceso. La eficiencia de estos paneles viene dada en base a las características propias de cada uno. Esta eficiencia puede ser mejorada con el acoplamiento de un mecanismo de posicionamiento [4]. Es importante entender que la ganancia extra obtenida por el sistema elegido, tiene que ser mayor a la consumida por los motores que accionan dicho sistema.

Los seguidores solares de dos ejes, existentes en el mercado, son accionados por mecanismos de transmisión que no son eficientes, por lo que consumen mayor energía que la que es generada por el panel fotovoltaico.

De los estudios realizados referentes a paneles fotovoltaicos con seguidores solares, se conoce que existe una ganancia de energía del 30%, con un sistema móvil [8].

En el presente proyecto se diseñará un prototipo de seguidor solar con dos grados de libertad, que posicione un panel fotovoltaico la mayor cantidad de tiempo expuesto a la radiación solar, con transmisiones que no precisen tener sus motores energizados para mantener la posición; mejorando de esta manera la eficiencia del panel fotovoltaico con respecto a la ganancia de energía obtenida.

El objetivo general del presente Proyecto es diseñar, analizar y simular el comportamiento mecánico de un prototipo de soporte con dos grados de libertad para posicionamiento perpendicular a la luz de un panel fotovoltaico de 100 W.

Los objetivos específicos planteados son:

- Revisar la información, acerca de los tipos de sistemas mecánicos para movimiento de paneles fotovoltaicos.

- Analizar los diferentes mecanismos de transmisión de movimiento utilizados en este tipo de soportes.
- Plantear alternativas referentes a seguidores de dos ejes.
- Diseñar un prototipo, en base a la mejor alternativa planteada, el prototipo debe ser sencillo de instalar, resistente, fácil de implementar, realizando todos los cálculos necesarios con referencias técnicas.
- Construir, ensamblar, probar y analizar el prototipo.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Sistema fotovoltaico

Los sistemas fotovoltaicos producen electricidad por medio de la radiación solar que incide sobre ellos [9]. Un sistema fotovoltaico consta de los siguientes componentes:

- Panel fotovoltaico
- Regulador de carga
- Batería
- Sensores de luz
- Motores
- Transmisiones
- Estructura de soporte
- Módulo de control
-



Fig. 1. Sistema fotovoltaico. Elaborado por: Robinson Tapia

Los conceptos propios de cada elemento son expuestos a continuación.

1.2. Componentes de un sistema fotovoltaico

1.2.1. Paneles fotovoltaicos

Primero, es necesario indicar una diferencia importante con el fin de no confundir los siguientes términos: Panel solar y Panel fotovoltaico.

Paneles solares: Son los que utilizan el calor de la radiación solar y su aplicación es para calentadores de agua [2].

Paneles fotovoltaicos: Son los que utilizan la radiación solar que incide sobre ellos y la convierten en energía eléctrica [4].

Los paneles fotovoltaicos se componen de celdas o también llamados módulos, los cuales convierten la radiación solar en energía eléctrica. Este cambio de energía es mediante el efecto fotovoltaico o fotoeléctrico [10].

El efecto fotovoltaico, es el proceso mediante el cual, una celda o módulo, convierte la luz solar en electricidad [1]. Este proceso se indica a continuación.

La luz contiene fotones, que al chocar con la superficie del panel, pueden ser: absorbidos, otros reflejados e incluso pueden pasar a través del panel. Únicamente los fotones que son absorbidos son capaces de generar electricidad. Estos fotones transfieren su energía al electrón del átomo que se encuentra en el panel, permitiendo que se genere una corriente eléctrica, la misma que será proporcional a la radiación absorbida [1].

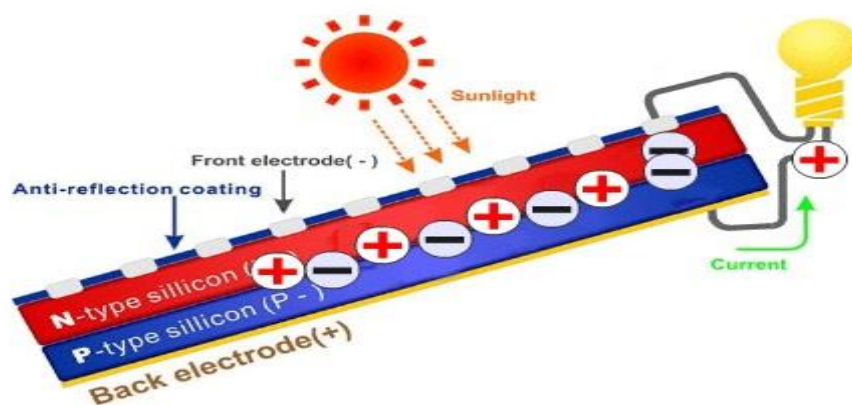


Fig. 2. Efecto fotovoltaico. Fuente: [7]

Comercialmente existen diferentes tipos de paneles, a continuación se muestran los más utilizados:

- a. Paneles mono cristalinos de celdas de silicio
- b. Paneles poli cristalinos de silicio
- c. Paneles de capa fina

a. Paneles mono cristalinos de celdas de silicio

Estos paneles son fáciles de reconocer por su coloración azul oscuro y aspecto uniforme, estas características indican: alta pureza de Silicio. Sus celdas tienen la forma de un cuadrado sin esquinas para facilitar su empaquetamiento.

Para la fabricación de éstas celdas se utilizan bloques de silicio mono cristalino. El silicio es un semimetal y también un semiconductor, su particular forma cilíndrica le da al material mejor conductividad eléctrica [2].

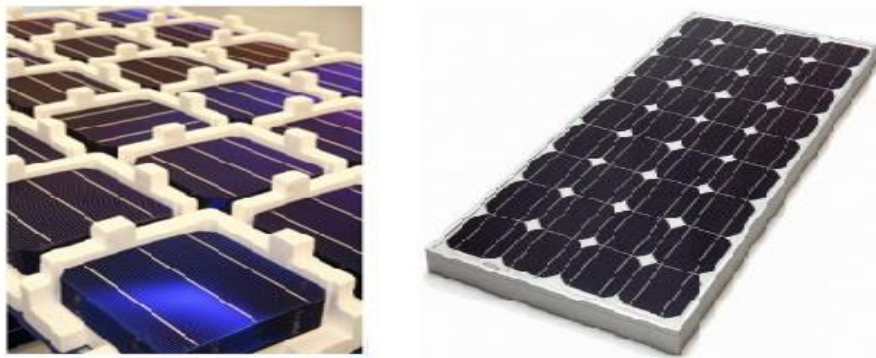


Fig. 3. Panel mono cristalino y celdas mono cristalinas. Fuente: [4]

Una de las ventajas de los paneles mono cristalinos es que estos tienen las mejores tasas de eficiencia del 15 – 20%, puesto que se producen con un solo bloque de silicio de alta pureza.

b. Paneles poli cristalinos de silicio



Fig. 4. Panel poli cristalino. Fuente: [4]

El proceso de manufactura de los paneles poli cristalinos es simple, a diferencia de los mono cristalinos. Es decir, se pierde menos silicio. El silicio en bruto se funde, luego se vierte en moldes perfectamente cuadrados, que al enfriarse son cortados en láminas, esto hace que el panel tenga una apariencia de escamas de metal y eficiencias entre el 13 – 16 % por lo que son menos costosos [2].

c. Paneles fotovoltaicos de capa fina

En la construcción de éstos paneles se usan materiales semiconductores como: silicio amorfo, cobre, galio, selenio, entre otros semimetales. El proceso de fabricación empieza, depositando varias capas de material en una base de substrato de vidrio, hasta formar una lámina fina y de superficie homogénea. Estos paneles se adaptan a diferentes superficies por la flexibilidad que presentan [2].



Fig. 5. Panel de capa fina. Fuente: [4]

Estos paneles son fáciles de fabricar y se producen en grandes remesas. Son más económicos que los cristalinos, pero tienen menor eficiencia del 7 – 13 %, por lo que

hay que utilizar mayor cantidad de paneles y cubrir áreas más grandes para generar la misma cantidad de energía.

Los paneles antes mencionados, utilizan para la sujeción de sus celdas, marcos externos, que por lo general son fabricados de materiales livianos como el aluminio y para garantizar la hermeticidad del panel se utiliza resina fundida.

Todos los paneles entregan voltajes variables, por lo que es necesario implementar elementos que regulen y almacenen el voltaje, a continuación se indican cada uno ellos.

- Regulador de carga
- Batería

1.3. Regulador de carga

El regulador evita las sobrecargas, cortocircuitos, descargas y también garantiza la vida útil de la batería, como de los demás componentes eléctricos y electrónicos [9].

1.4. Baterías

Son elementos de almacenamiento de energía, una parte de la energía acumulada puede ser usada en otras aplicaciones, como: alimentación de circuitos de control o iluminación [9].

La intensidad de luz que incide en los paneles, es captada mediante un dispositivo electrónico que se indican a continuación.

1.5. Sensores de luz

Un sensor de luz o fotoeléctrico responde al cambio en la intensidad de la luz. Este incluye un transductor que convierte la luz en una señal eléctrica, puede incluir electrónica para condicionamiento, compensación y formateo de la señal de salida [11]. Se presentan dos tipos de sensores que se utilizan para la medición de luz y radiación solar.

a. Sensor fotoeléctrico LDR (Light Dependent Resistor)

El LDR es una resistencia que cambia su valor cuando la intensidad de la luz varía, ofrecen menor resistencia cuanto mayor es la luminosidad. Estos sensores LDR funcionan hasta con una tensión de 150 V y su tiempo de respuesta es de 30 ms. Su sensibilidad aumenta con la temperatura, es decir; a mayor temperatura, menor resistencia [11].

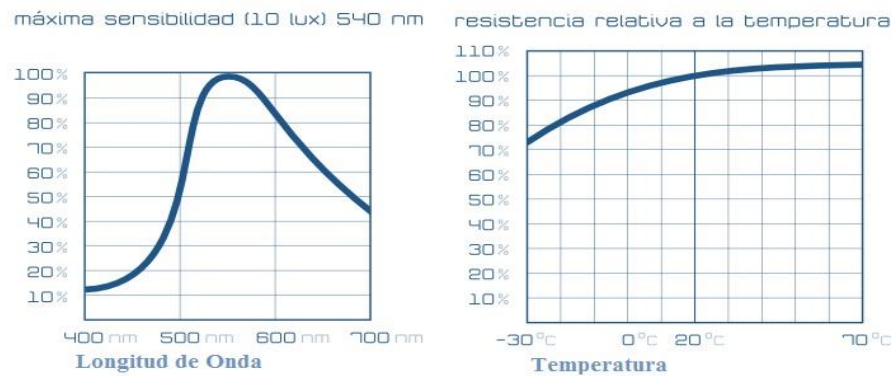


Fig. 6. Sensibilidad de los sensores LDR. Fuente: [11]

Los sensores LDR son fáciles de utilizar, se usan para detectar cambios de luz lento, se puede observar que su sensibilidad se ve afectada por la temperatura, particularmente a baja temperatura, Figura 6. Estos sensores se utilizan para detectar la presencia de luz más que para medir su intensidad.

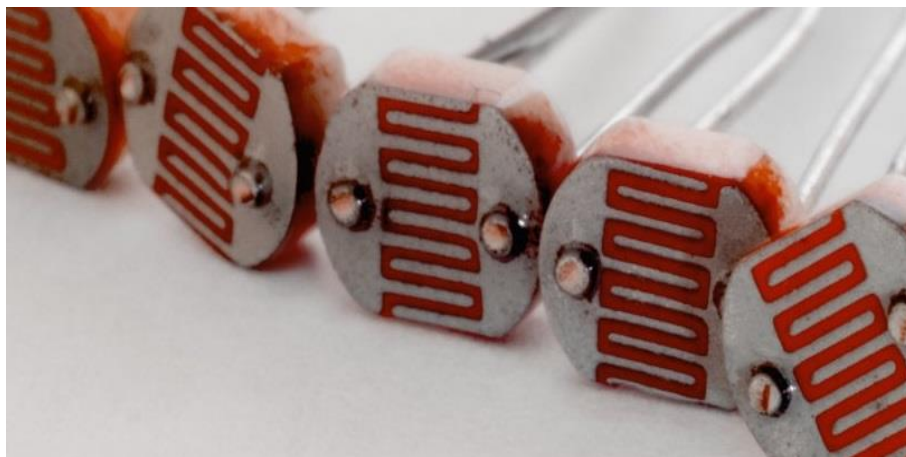


Fig. 7. Sensores LDR. Fuente: [11]

Los sensores LDR, Figura 7. (Resistencias Dependientes de la Luz), son utilizados para accionar luces automáticamente, cuando la oscuridad sobrepasa cierto umbral o

como detectores de movimiento próximo (cuando algo se interpone) y en pequeños robots seguidores de luz [11].

A continuación, se describen algunas de sus características físicas y ventajas, que pueden ser de gran ayuda al momento de escoger el sensor que más convenga para el desarrollo del prototipo.

- Son pequeños y fáciles de instalar
- Se usan para detectar la presencia de luz
- Son de bajo costo

La curva característica de Resistencia vs. Luminosidad de LDR es la siguiente:

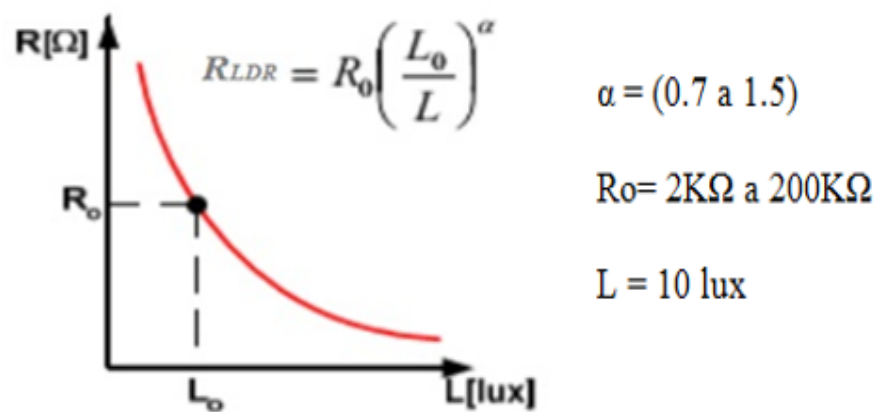


Fig. 8. Curva de Resistencia vs. Luminosidad. Fuente: [6, p. 96]

b. Piranómetros

Este tipo de instrumentos son utilizados para medir la radiación solar, generalmente en una superficie horizontal. Las bandas negras del sensor (termopila) absorben la radiación solar que se transforma en calor. Este calor fluye atravesando los sensores hacia el cuerpo del piranómetro, proveyendo una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente [9].

Todos los piranómetros (basados en termopila) tienen un campo de recepción de 180° lo que permite medir la radiación solar hemisférica. Este tipo de instrumentos son utilizados en aplicaciones de alta exigencia como: meteorología, investigación de

campo y control de la radiación solar, global y difusa. Por su alta tecnología estos sensores son muy costosos y poco comerciales, además para realizar su mantenimiento se necesita personal calificado, se muestra este sensor en la Figura 9.

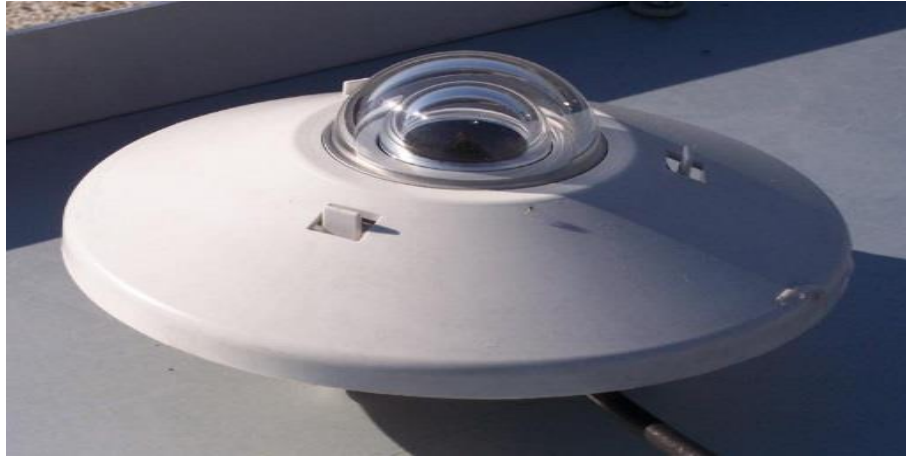


Fig. 9. Piranómetro. Fuente: [12]

Para realizar el movimiento del panel fotovoltaico se usan motores, estos transforman la energía eléctrica en energía mecánica.

Dentro del campo de los motores podemos encontrar dos tipos, que son: de corriente alterna y de corriente continua. Para el desarrollo de este proyecto se describirá únicamente los motores de corriente continua.

1.6. Motores de corriente continua

La energía utilizada para accionar estos motores es suministrada por una batería de 12Vcc. A continuación se describen tres tipos de motores de corriente continua.

a. Motor paso a paso (PAP)

Todas las bobinas de un motor PAP se encuentran ubicadas en su estator y su rotor es, o un imán permanente o, en el caso de motores de reluctancia variable un bloque de algún material magnéticamente blando. Estos motores tienen la característica de quedarse enclavados en una posición, siempre y cuando una de sus bobinas esté energizada [13].

Si sus bobinas están sin energía entonces el rotor queda libre, es decir, que puede girar por efecto de alguna fuerza externa, se muestra un motor PAP utilizado en robótica en la Figura 10.

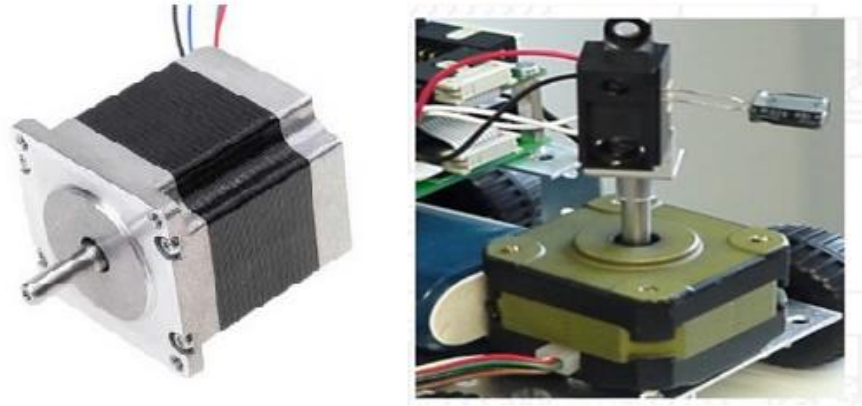


Fig. 10. Motor paso a paso (PAP). Fuente: [14]

b. Motores de corriente continua

Estos motores son muy utilizados en robótica, se caracterizan por tener altas velocidades que oscilan entre 2000 rpm y 7000 rpm, pero debido a sus altas revoluciones el torque que tienen es muy bajo [13].



Fig. 11. Motor de corriente continua. Elaborado por: Robinson Tapia

c. Motor reductor de corriente continua

Estos se componen de un motor eléctrico y una caja reductora, a su vez, la caja reductora está formada por trenes de engranajes que pueden ser simples o

compuestos, a la salida de la caja, las revoluciones disminuyen y se aumenta el torque [13].

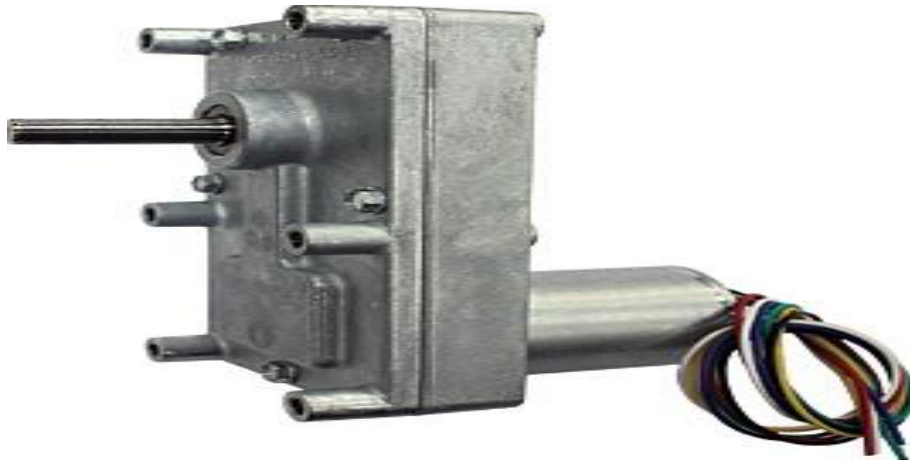


Fig. 12. Motor reductor 12 Vcc. Elaborado por: Robinson Tapia

Estos motorreductores son muy utilizados, por su versatilidad y diseño compacto. Además, presentan las siguientes ventajas.

- Baja velocidad de salida
- Alto torque
- Bajo mantenimiento
- De fácil montaje
- Económicos
- Comerciales

Los componentes como: motores, sensores, panel fotovoltaico, regulador, batería, deben ser gobernados o controlados por un circuito electrónico el cual interpretará las mediciones obtenidas y las traducirá en ordenes de accionamiento o apagado del sistema, por lo que a continuación se indica el componente encargado de dicha labor. Es decir, el módulo de control es capaz de monitorear las entradas provenientes de los sensores, la tensión de alimentación y la operatividad del equipo, cada una de estas variables puede activar o desactivar una o varias acciones como son activar los motores, invertir el giro de los motores, desactivar los motores, entre otras funciones. Toda máquina en la que su movimiento sea generado por un motor eléctrico, necesita para su correcto funcionamiento que la velocidad de dicho motor se ajuste a la

velocidad requerida por ésta. Este ajuste se lo realiza por medio de transmisiones, las mismas que no solo regulan la velocidad del motor, sino también mejoran su torque, seguidamente se presentan tres tipos de transmisiones:

a. Transmisión por tornillo sinfín y corona

Este tipo de transmisión es probablemente la más sencilla, se compone principalmente de una corona dentada a la cual en su centro se conecta un eje de salida llamado (eje lento), para dar movimiento a esta corona se hace uso de un tornillo sinfín que siempre está engranado con la corona, el eje de este sinfín es llamado eje de entrada, aquí es donde se conecta el motor. La reducción de velocidad se da cuando el tornillo sinfín realiza una vuelta completa, mientras que la corona avanza un diente [15]. Este tipo de transmisión permite conectar ejes que se cruzan perpendicularmente.

Para poder realizar el cálculo referente a la velocidad de salida se hace uso de la siguiente fórmula:

$$n_1 \times e_1 = n_2 \times Z_2 \quad [15] (1)$$

Donde

n_1 = Velocidad de entrada (rpm)

n_2 = Velocidad de salida (rpm)

e_1 = Número de entradas del tornillo sin fin

Z_2 = Número de dientes de la corona

La relación de transmisión del sistema viene dada por la siguiente fórmula:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{e_1}{Z_2} \quad [15] (2)$$

Donde

i = Relación de transmisión del sistema (adimensional)

Este sistema de tornillo sinfín y corona es irreversible, esto quiere decir que no es necesario mantener el motor energizado para que el mecanismo se mantenga enclavado.



Fig. 13. Mecanismo de tornillo sinfín y corona. Elaborado por: Robinson Tapia

b. Transmisión por engranajes

Este tipo de transmisión se la realiza mediante pares de engranajes de cualquier tipo, claro está, excepto los basados en tornillo sinfín y corona. Las mayores ventajas que brindan este tipo de transmisiones son:

- Bajo mantenimiento
- Diseño compacto, que se traduce en menor peso y espacio
- Buena potencia
- Buen torque
- Baja vibración y nivel sonoro

Estas transmisiones sirven para reducir la velocidad de una manera óptima, el eje de entrada del motor y el eje de salida de la transmisión están en planos paralelos, con esto se puede conseguir cajas reductoras muy planas, con el fin de ocupar o utilizar menos espacio para el mecanismo [15].

Comercialmente se encuentran reductores formados por trenes de engranajes, estos trenes pueden ser de dos tipos: tren de engranajes simples y tren de engranajes compuestos. Para determinar la velocidad de salida del tren de engranajes simple o compuesto se hace uso de la formula siguiente:

$$n_1 \times Z_1 = n_2 \times Z_2 \quad [15] (3)$$

Donde

n_1 = Velocidad de entrada (rpm)

n_2 = Velocidad de salida (rpm)

Z_1 = Número de dientes de la rueda conductora

Z_2 = Número de dientes de la rueda conducida

c. Trenes de engranajes compuestos

El tren de engranajes compuestos es aquel que en cada uno de sus ejes tienen dos engranajes, diferentes en tamaño y número de dientes pero que giran a la misma velocidad, uno de estos engranajes funciona como conducido y el otro que está en el mismo eje funciona como conductor del siguiente engranaje [16], como se indica en la Figura 14.

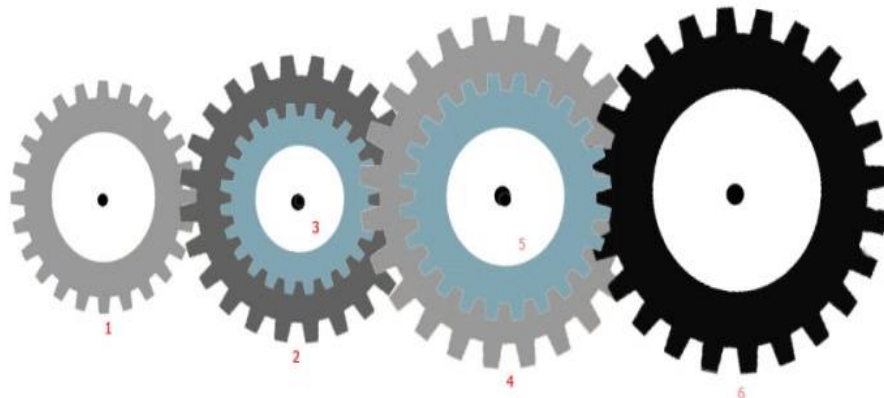


Fig. 14. Tren de engranajes dobles de ejes paralelos. Fuente: [16]

El engranaje motriz Z_1 es el conductor del engranaje Z_2 y este es conducido, el engranaje Z_3 al estar en el mismo eje del engranaje Z_2 funciona como conductor para el engranaje Z_4 que viene a ser un engranaje conducido y así sucesivamente hasta llegar al último engranaje que será un conducido, en donde se encuentre el eje de salida del mecanismo [16].

Las ventajas que presenta este tren de engranajes es que se obtiene exactitud en la relación de transmisión y permite cambios en el sentido de giro.

Para realizar el cálculo referente al valor del tren (e) se usa la formula siguiente:

$$e = \frac{\text{Producto del número de dientes impulsores}}{\text{Producto del número de dientes impulsados}} \quad [16, p. 865] (4)$$

$$n_L = e \times n_F$$

Donde

n_L = Re voluciones por min uto del último engranaje del tren

n_F = Re voluciones por min uto del primer engranaje del tren

e = Valor del tren

Siguiendo con la descripción de los componentes de un sistema fotovoltaico, a continuación se muestra otro elemento, no menos importante, que es la estructura que soporta el panel y mecanismos.

Al tratar sobre la estructura de soporte, en primer lugar se identificarán las condiciones en las que tiene que trabajar el sistema, con el fin de seleccionar el material adecuado con el que se construirá la estructura, también el rango de movimiento que puede llegar a tener, sin afectar al resto de los componentes. Se presentan dos de los modelos existentes en el mercado:

a. Estructura de soporte tipo carrusel

Las estructuras carrusel de suelo ofrecen una gran estabilidad al volcamiento, y transmiten presiones muy bajas al terreno, esto porque la carga es distribuida de manera uniforme. Estas estructuras tienen alturas con respecto al suelo, relativamente bajas entre 0,60 m y 1,20 m, son usadas en seguidores de un solo eje, en la Figura 15. Se muestra el soporte carrusel [17].

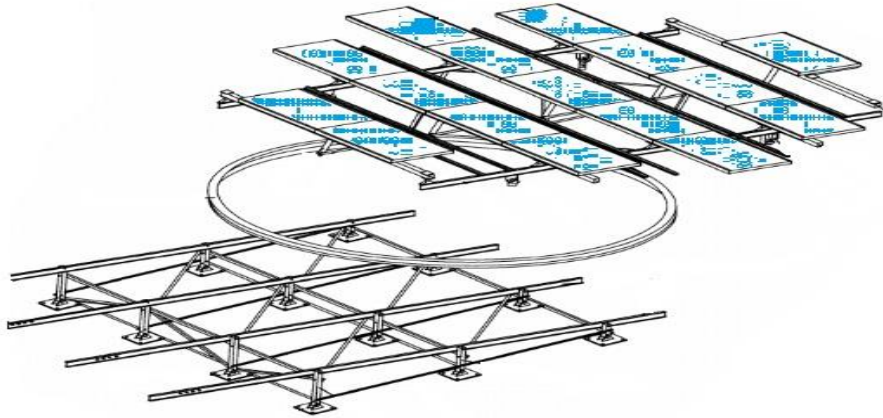


Fig. 15. Estructura de soporte tipo carrusel. Elaborado por: Robinson Tapia

b. Estructura de soporte tipo mono poste

Las estructuras mono poste son utilizadas también en señalizaciones de carreteras, publicidad e iluminación. Consisten básicamente en un pilar, el cual debe estar apoyado en una base de hormigón armado para garantizar su estabilidad, en la parte superior de este pilar se encuentra acoplada la estructura que soporta al panel y sus mecanismos, como se indica en la Figura 16. [17].



Fig. 16. Estructura tipo mono poste. Elaborado por: Robinson Tapia

Estos modelos de estructuras, comparten características físicas similares, como son:

- Estructura liviana
- Resistentes a la corrosión
- Tienen estabilidad y firmeza

Estas estructuras son fabricadas con materiales livianos y resistentes a la corrosión, como, por ejemplo: acero inoxidable y aluminio.

1.7. Seguidores solares

Los seguidores solares permiten aumentar notablemente la captación de energía, comercialmente se encuentran dos tipos, según sus grados de libertad.

De manera general, los grados de libertad que tiene un mecanismo son el número de parámetros de entrada que se debe controlar independientemente. También llamados pares giratorios [20].

a. Seguidores de un eje

La rotación de la superficie de captación del panel fotovoltaico se realiza en un solo eje, este puede ser: horizontal, vertical u oblicuo; por lo que estos seguidores orientan al panel fotovoltaico a lo largo del eje azimuth, es decir entre la orientación Este a Oeste del día, como aquí se indica en la Figura 17.

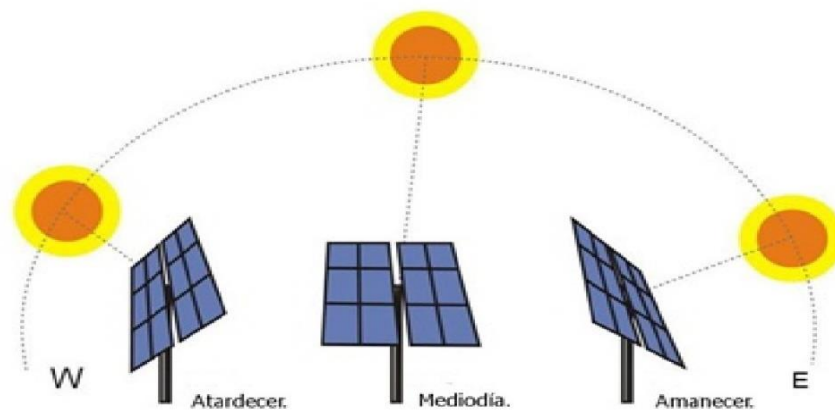


Fig. 17. Seguimiento del sol en el eje azimuth. Fuente: [5]

b. Seguidor de dos ejes

Estos seguidores además de orientar el panel fotovoltaico a lo largo del eje azimuth, también siguen el ángulo de elevación del sol, eje cenit consiguiendo de esta manera un seguimiento total, este seguimiento se indica en la Figura 18.

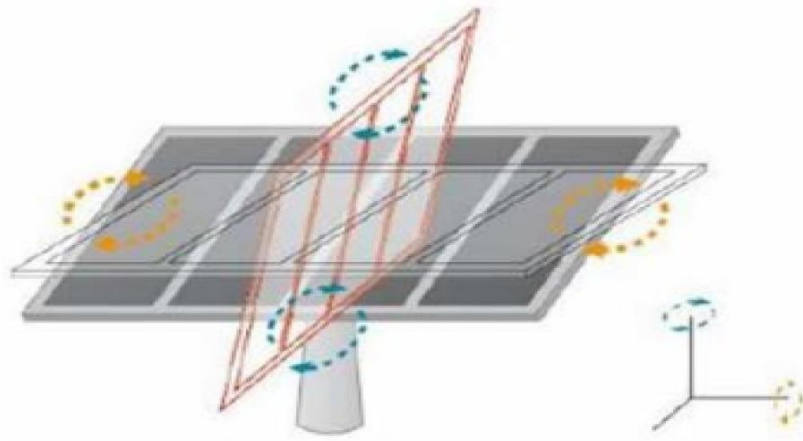


Fig. 18. Seguimiento del sol en dos ejes. Fuente: [5]

1.8. Tipos de seguimiento solar

El seguimiento solar se puede realizar por tres métodos que se menciona a continuación:

a. Seguimiento por reloj solar

Este tipo de seguimiento tiene como unidad de tiempo 24 horas, tiene un seguimiento efectivo de 12 horas, variando su posición con respecto al ciclo en el que se encuentre la unidad, es decir su posición cambia conforme avanza el tiempo en el reloj [21, p. 58].

b. Seguimiento por sensores de luz

Este se basa en la variación del valor de la resistencia eléctrica dependiendo de la cantidad de luz que incide sobre él, por lo que cambia su posición hasta encontrar el ángulo correcto entre la superficie del panel fotovoltaico y la radiación solar que en él incide [22, p. 377].

c. Seguimiento por coordenadas calculadas

Para que el seguidor realice los movimientos es necesario conocer la trayectoria del sol y realizar los cálculos de las coordenadas astronómicas, este tipo de algoritmo no identifica si existe presencia de radiación o la existencia de nubosidades en el ambiente. Simplemente sigue una trayectoria ya establecida [5, p. 220].

CAPÍTULO II

SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA A SER CONSTRUIDA

2.1. Metodología para la obtención de la mejor alternativa

En primer lugar, se define la funcionalidad básica del prototipo, así como también las características que deben tener cada una de sus partes, para garantizar el óptimo funcionamiento del sistema, entendiéndose como esto; la mayor captación de luz, durante el mayor tiempo posible y con el menor consumo de energía para posicionar el panel. Una vez definidas las funcionalidades básicas del sistema y sus componentes estas serán analizadas y se obtendrá una lista de parámetros de evaluación. Seguidamente, se plantearán tres posibles alternativas, las mismas que serán analizadas de acuerdo a los requerimientos establecidos en la lista de parámetros, valorados en una escala de 0 a 10, siendo 0 el valor menor y 10 el valor mayor, logrando con esto la selección de la mejor alternativa para ser construida.

2.2. Requerimientos del sistema

Para definir los parámetros de diseño se parte de los requerimientos y características que debe cumplir el sistema, los cuales son los siguientes:

2.2.1. Requisitos de funcionalidad

- a.** Exactitud en su posicionamiento: La transmisión debe permitir ángulos de giro no mayores a 15 grados por cada revolución.
- b.** Bloqueo del posicionamiento: El mecanismo debe mantener los paneles fijos, evitando que su posición cambie por fuerzas externas como el viento.
- c.** Bajo consumo de potencia en sus actuadores: Potencias entre 3W a 8W.

2.2.2. Características técnicas

- d.** Facilidad de fabricación: Uso de maquinaria de fácil acceso como torno, fresadora, herramienta eléctrica y manual.
- e.** Facilidad de montaje: Piezas y partes modulares, que permitan separar o ensamblar el conjunto con facilidad.

f. Facilidad de mantenimiento: Piezas y partes fáciles de limpiar, engrasar y reemplazar.

2.2.3. Características económicas

g. Bajo costo: Utilización de materiales, piezas y partes comerciales.

2.2.4. Características operacionales

h. Durable en el tiempo: Utilización de materiales resistentes a la corrosión.

2.3. Parámetros a ser evaluados

Del análisis de los requerimientos de funcionalidad tanto del sistema como de sus componentes se puede determinar que los parámetros básicos de funcionamiento a ser evaluados son:

Tabla 1
Ponderación de parámetros

PARÁMETRO	PONDERACIÓN
a. Exactitud en su posicionamiento	10
b. Bloqueo del posicionamiento	10
c. Bajo consumo de potencia en sus actuadores	10
d. Facilidad de fabricación	6
e. Facilidad de montaje	5
f. Facilidad de mantenimiento	5
g. Bajo costo	6
h. Durable en el tiempo	8

Elaborado por: Robinson Tapia

2.3.1. Exactitud en su posicionamiento (valoración intrínseca)

Puesto que la posición del panel fotovoltaico con respecto a la luz, tiene que ser perpendicular, la transmisión debe permitir ángulos de giro no mayores a 15 grados por cada revolución. Siendo 0 el menor valor y 10 el mayor valor.

2.3.2. Bloqueo del posicionamiento (valoración intrínseca)

Como el panel va a estar expuesto a fuerzas externas como el viento o la manipulación humana se debe garantizar que su movimiento solo debe estar dado por el módulo de control. Siendo 0 el menor valor y 10 el mayor valor.

2.3.3. Bajo consumo de potencia (valoración no intrínseca)

El panel debe ser autosustentable energéticamente, esto quiere decir que la energía que acumule debe servir para su propio movimiento así como para dotar de energía a sistemas externos. Siendo 0 el menor valor y 10 el mayor valor.

2.3.4. Facilidad de fabricación (valoración intrínseca)

Las piezas del equipo deben ser fáciles de fabricar, entendiéndose por esto que las maquinarias con las cuales son construidas sean de fácil acceso como torno, fresadora, soldadora, herramienta eléctrica y manual. Siendo 0 el menor valor y 6 el mayor valor.

2.3.5. Facilidad de montaje (valoración no intrínseca)

El equipo tiene que ser de fácil montaje esto quiere decir que debe utilizar el menor número de personas y debe ser realizado en el menor tiempo, del análisis del trabajo a realizarse en el montaje se determina que siempre se van a necesitar 2 personas lo que convierte a la variable “número de personas” en una constante que es 2, por lo tanto este parámetro será valorado solo con respecto a la variable tiempo empleado. Siendo 0 el menor valor y 5 el mayor valor.

2.3.6. Facilidad de mantenimiento (valoración no intrínseca)

El equipo debe tener mantenimientos preventivos y correctivos según sea el caso, se entiende por facilidad de mantenimiento el número de horas invertidas en el mismo, y el número de personas, aquí también intervienen 2 personas lo que convierte a la variable “número de personas” en una constante que es 2, por lo tanto este parámetro será valorado solo con respecto a la variable tiempo empleado. Siendo 0 el menor valor y 5 el mayor valor.

2.3.7. Bajo Costo (valoración no intrínseca)

Este parámetro será evaluado en función del análisis de costo de cada una de las alternativas. Siendo 0 el menor valor y 6 el mayor valor.

2.3.8. Durable en el tiempo (valoración intrínseca)

Este parámetro está definido por la identificación de componentes del prototipo elaborados en materiales resistentes a la corrosión, Siendo 0 el menor valor y 8 el mayor valor.

2.4. Presentación de alternativas

Para implementar los requisitos de funcionalidad del sistema Fotovoltaico y los requerimientos de cada uno de sus componentes especificados en las secciones anteriores se plantean las siguientes alternativas.

- Alternativa 1: Seguidor solar con transmisión de poleas y cables
- Alternativa 2: Seguidor solar con transmisión por tornillo sinfín y corona
- Alternativa 3: Seguidor solar con transmisión mediante brazo balancín

2.5. Desarrollo de la alternativa 1

2.5.1. Seguidor solar con transmisión de poleas y cables

Este sistema tiene como objetivo principal la reducción del rozamiento de su mecanismo de transmisión para optimizar el uso de energía de sus actuadores. El sistema se basa en el apoyo del panel sobre una esfera la misma que está colocada sobre la columna que constituye el soporte principal del mecanismo, la tracción para el movimiento está dada por medio de poleas y cables dispuestos en cada uno de sus ejes como se muestra en la Figura 19.

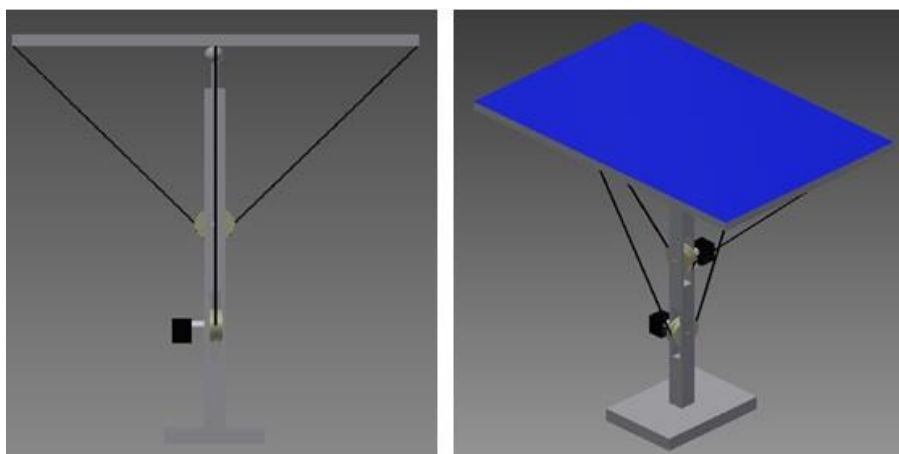


Fig. 19. Seguidor Solar tipo mono poste con transmisión de poleas y cables.

Elaborado por: Robinson Tapia

Tabla 2
Listado de componentes

Componentes	Material	Fabricado comprado	Tiempo (horas)	Maquinaria utilizada	Costo
Diseño			120		\$ 800
Panel, regulador y batería	Celdas fotovoltaicas Marco de Aluminio	Comprado	0		\$ 750
2 Poleas	Duralón	Fabricado	8	Torno y fresadora	\$ 120
20 m de cable	Polímero	Comprado	0		\$ 30
1 Esfera de 40mm de diámetro y porta esfera	Acero inoxidable (304)	Fabricado	4	CNC	\$ 160
Estructura	Acero inoxidable (304)	Fabricado	100	Herramienta manual y soldadura	\$ 450
2 Motores	Aluminio	Comprado			\$280
Módulo de control		Comprado			\$1100

Costo en dólares	\$3.590
Elaborado por: Robinson Tapia	

Tabla 3
Ficha técnica

Característica	Descripción
Angulo de giro	30 grados
Bloqueo del posicionamiento	Manipulable manualmente o por efecto de fuerzas externas como el viento, debido a que el cable se desliza en la polea, provocando que los cables se tensionen y no pueda mantener un movimiento uniforme.
Montaje	Número de personas requeridas: 2 Número de horas utilizadas: 3
Mantenimiento	Número de personas requeridas: 2 Número de horas utilizadas: 3
Durable	El mecanismo de transmisión al estar compuesto por cables de material plástico presenta resistencia a la corrosión pero al ser delgados se degradan con rapidez al estar expuestos al sol y lluvia de días ordinarios, estos se vuelven quebradizos.
Bajo costo	Los materiales a utilizar en esta alternativa son de bajo costo y también comerciales.

Elaborado por: Robinson Tapia

2.5.2. Funcionalidad

Una vez realizado el análisis de la alternativa uno, se pudo comprobar que la esfera a la cual va apoyada el panel fotovoltaico permite que este pivotee con facilidad en cualquier dirección pero, al ser únicamente un sistema de acoplamiento fue necesaria la implementación de poleas ubicadas en la parte inferior de la columna a través de las cuales se bobinaban cables de nylon, los mismos que se sujetaban en cada extremo del panel para poder dar tracción al mismo.

Del diseño realizado se pudo identificar que la trayectoria descrita por el panel con respecto a su esfera de apoyo central consistía en una elipse, esto provocaba que la trayectoria no sea uniforme ya que en ciertos momentos los cables de un lado se tensionaban, mientras que el otro extremo se des tensionaba provocando un cambio de posición brusco.

2.6. Desarrollo de la alternativa 2

2.6.1. Seguidor solar con transmisión por tornillo sinfín y corona

En esta alternativa se puede observar que el panel está apoyado en una estructura y que la tracción para el movimiento está dada por medio de tornillo sin fin y corona en cada uno de sus ejes, permitiendo dos grados de libertad.

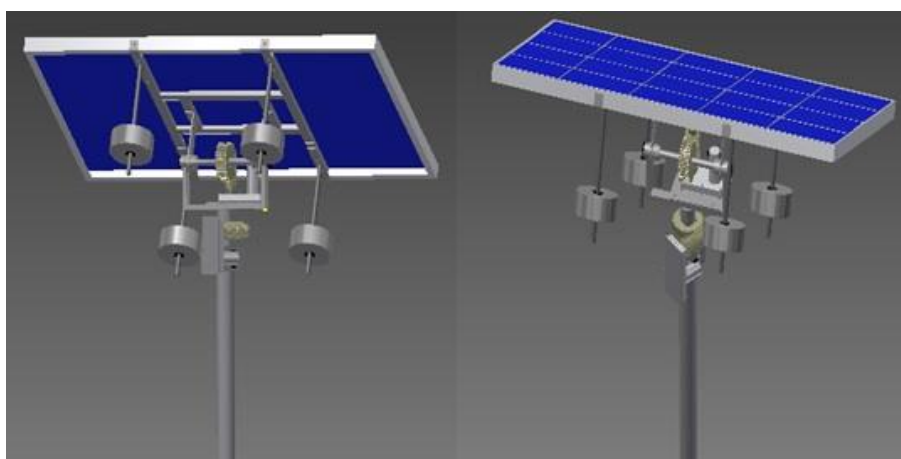


Fig. 20. Seguidor solar tipo mono poste con tronillo sinfín y corona. Elaborado por: Robinson Tapia

Tabla 4
Listado de componentes

Componentes	Material	Fabricado comprado	Tiempo (horas)	Maquinaria utilizada	Costo
Diseño		Fabricado	100		\$ 600
	Celdas				
Panel, regulador y batería	fotovoltaicas Marco de Aluminio	Comprado	0		\$ 750
2 Coronas	Duralón	Fabricado	6	Torno y	\$ 80

				fresadora	
8 Contrapesos	Acero de transmisión	Fabricado	4	Torno	\$ 120
Estructura	Acero inoxidable (304)	Fabricado	100	Herramienta manual y soldadura	\$ 300
2 Motorreductores	Aluminio	Comprado			\$240
Módulo de control		Comprado			\$1100
Costo en dólares					\$3.190
Elaborado por: Robinson Tapia					

Tabla 5
Ficha técnica

Características	Descripción
Angulo de giro	3.72 grados
Bloqueo del posicionamiento	Solo gira cuando el módulo de control da la orden, como la transmisión es mediante tornillo sinfín y corona el mecanismo se auto enclava sin necesidad de mantener energizado el actuador.
Montaje	Número de personas requeridas: 2 Número de horas utilizadas: 4
Mantenimiento	Número de personas requeridas: 2 Número de horas utilizadas: 2
Durable	Todas las piezas y partes son construidas en materiales resistentes a la corrosión.
Bajo costo	Los materiales a utilizar en esta alternativa son de bajo costo y también comerciales, (Acero inoxidable y Duralón).

Elaborado por: Robinson Tapia

2.6.2. Funcionalidad

De acuerdo al análisis y diseño realizado se pudo observar que el sistema presenta buena estabilidad, movimiento uniforme en toda su trayectoria. Cuando el panel es montado en la transmisión superior, este genera un momento el cual es resuelto con los contrapesos ubicados en los extremos del panel, manteniéndolo en equilibrio y minimizando de esta forma la utilización de actuadores de alta potencia. El sistema puede girar libremente y no presenta interferencias con otros elementos.

2.7. Desarrollo de la alternativa 3

2.7.1. Seguidor solar con transmisión por brazo balancín

En esta alternativa se puede observar que el panel está apoyado en cuatro esferas y que la tracción para el movimiento está dada por medio de brazos balancines dispuestos en cada uno de sus ejes.

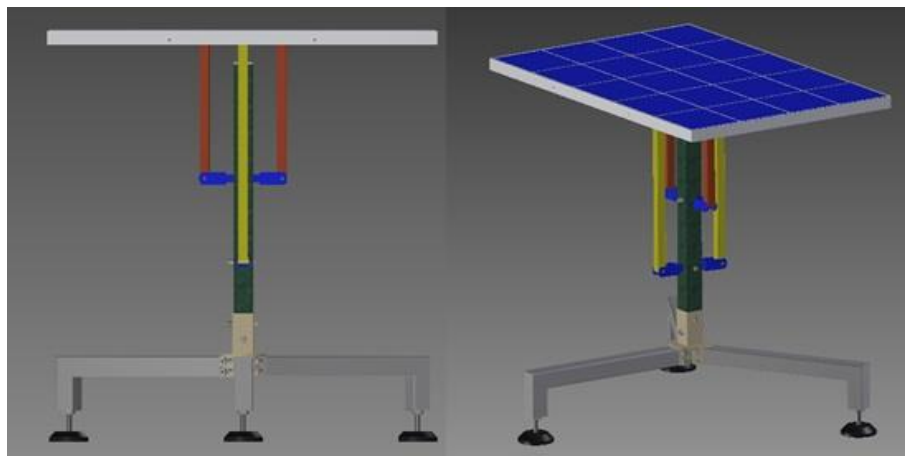


Fig. 21. Seguidor solar con transmisión por brazo balancín. Elaborado por: Robinson Tapia

Tabla 6
Listado de componentes

Componente	Material	Fabricado comprado	Tiempo (horas)	Maquinaria utilizada	Costo
Diseño		Fabricado	100		\$ 600
Panel,	Celdas				
regulador y	fotovoltaicas	Comprado	0		\$ 750
batería	Marco de				

Aluminio					
8 Brazos con sus herrajes	Acero Inoxidable (304)	Fabricado	6	Torno, Fresadora, Herramienta manual	\$ 260
4 Esferas y 4 Porta esferas	Acero Inoxidable (304)	Fabricado	8	CNC	\$ 380
Estructura	Acero inoxidable (304)	Fabricado	100	Herramienta manual y soldadura	\$ 300
2 Motor-reductores	Aluminio	Comprado			\$240
Módulo de control		Comprado			\$1100
Costo en dólares					\$3.630

Elaborado por: Robinson Tapia

Tabla 7
Ficha técnica

Característica	Descripción
Angulo de giro	30 grados
Bloqueo del posicionamiento	Manipulable manualmente o por efecto de fuerzas externas como el viento, para solventar este problema es necesario mantener el actuador energizado, por lo que tenemos que consumir más energía de la necesaria.
Montaje	Número de personas requeridas: 3 Número de horas utilizadas: 8
Mantenimiento	Número de personas requeridas: 3 Número de horas utilizadas: 8
Durable	Todas las piezas y partes son construidas en materiales resistentes a la corrosión.

Bajo costo	Los materiales a utilizar en esta alternativa son de bajo costo y también comerciales, (Acero inoxidable y Duralón).
------------	--

Elaborado por: Robinson Tapia

2.7.2. Funcionalidad

Una vez realizado el análisis de la alternativa tres, se pudo comprobar que las esferas a las cuales va apoyada el panel fotovoltaico permite la movilidad de este, pero al ser únicamente un sistema de apoyo fue necesaria la implementación de brazos tipo balancines ubicados en la parte inferior de la columna, los mismos que se sujetaban en cada extremo del panel para poder dar tracción al mismo.

Del diseño realizado se pudo identificar que la trayectoria descrita por el panel con respecto a su esfera de apoyo central consistía en una elipse, esto provocaba que la trayectoria no sea uniforme presentándose cambios bruscos en su posición e incluso frenados por atascamiento de sus esferas base. Las tres alternativas se evaluarán de acuerdo a sus respectivas escalas.

2.8. Evaluación de alternativas

Como se mencionó anteriormente el prototipo será evaluado en una escala de 0 a 10 con respecto a los parámetros establecidos. Ver Tabla 1.

Alternativas a ser evaluadas:

- 1) Seguidor solar con transmisión de poleas y bandas.
- 2) Seguidor solar con transmisión por tornillo sinfín y corona.
- 3) Seguidor solar con transmisión por brazo balancín.

Tabla 8
Evaluación de alternativas

REQUISITOS		ALTERNATIVAS		
		1	2	3
a.	Exactitud en su posición	7	8	7
b.	Bloqueo del posicionamiento	6	10	7
c.	Bajo consumo de potencia	5	8	6
d.	Facilidad de fabricación	6	6	4
e.	Facilidad de montaje	5	5	4
f.	Facilidad de mantenimiento	5	5	3
g.	Bajo costo	6	6	3
h.	Durable en el tiempo	8	8	8
TOTAL		48	56	42

Elaborado por: Robinson Tapia

Del resultado obtenido en la Tabla 8 se puede observar que la alternativa 2 es la más favorable por lo que será la seleccionada para ser construida, la siguiente figura indica el seguidor solar con transmisión por tornillo sinfín y corona.

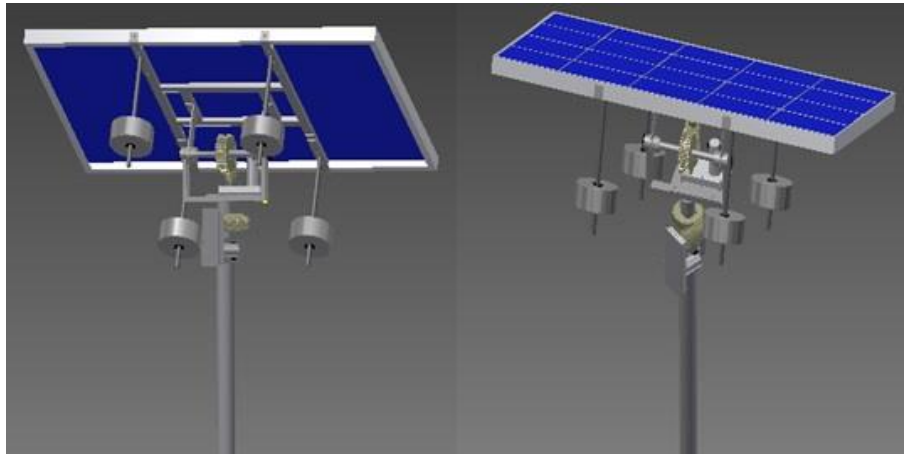


Fig. 22. Alternativa 2. Elaborado por: Robinson Tapia

CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

3.1. Dimensionamiento de los elementos

Del análisis de los sistemas fotovoltaicos existentes y considerando que el sistema a desarrollar es un prototipo, se establecen las siguientes características físicas del sistema, para en base a ellas diseñar el soporte mecánico y realizar su construcción.

Tabla 9
Características físicas de los elementos

ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS
Panel FV	Largo: 1005 mm, Ancho: 668 mm Profundidad: 35 mm Peso: 8 kg
Columna	Material: Tubo de Acero inoxidable Largo: 900 mm, Diámetro: 2"
Patas	Material: Tubo de Acero inoxidable Largo: 570 mm, Diámetro: 1"1/2 Ubicación a 120° una respecto a otra.
Contrapesos	Material: Acero A-36 Pesas diámetro: 100 mm Recubrimiento Pintura Electrostática Espárragos de 1/2" en acero inoxidable
Estructura base panel FV	Material: Tubo de Acero inoxidable Largo: 670 mm Ancho: 400 mm Geometría del tubo rectangular: 1" x 1/2"
Transmisión	Material: Aluminio Motor DC: 12V Caja reductora de ejes paralelos Salida Tornillo sinfín y corona (Duralón)

	Sensores de luz LDR
Control	Tarjeta electrónica
	Tablero de control
Elaborado por: Robinson Tapia	

3.2. Determinación de las fuerzas que actúan en el sistema

En base a las características físicas del sistema, definidas anteriormente se procede a determinar las fuerzas que actúan en éste, las mismas que son:

- Fuerza producida por el viento
- Fuerza producto del peso del panel
- Fuerza producto del mantenimiento
- Fuerza producto del peso de la estructura base que soporta al panel y los contrapesos.

3.2.1. Fuerza del viento

Se considera que el panel está en la posición más crítica, es decir a 90° con respecto a la horizontal, formando una pared que se opone a la circulación del viento.

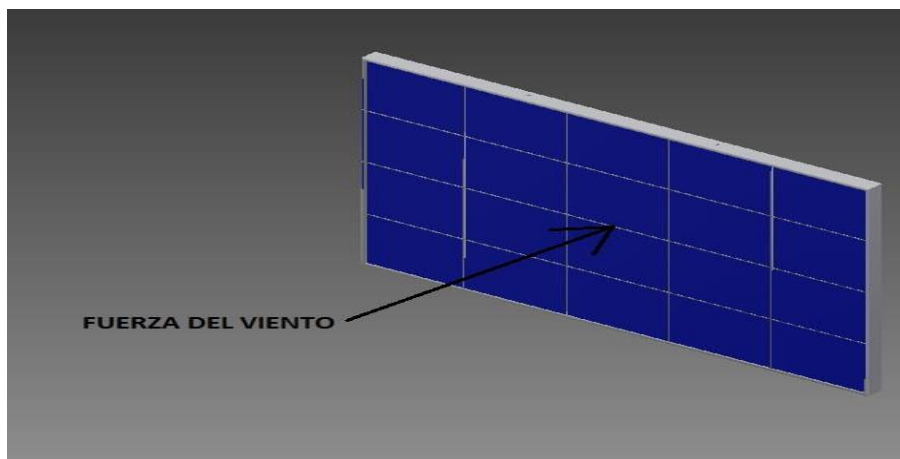


Fig. 23. Fuerza del viento. Elaborado por: Robinson Tapia

Como ya se mencionó anteriormente las medidas del panel, se procede a calcular el área de contacto.

$$A = b \times h \quad [23] \quad (5)$$

$$A = 1.005 \text{ m} \times 0.668 \text{ m}$$

$$A = 0.67 \text{ m}^2$$

Se considera que el viento actúa como presión sobre los elementos para lo cual se calcula una presión **P**, cuyo valor se determina mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times V b^2 \times C_e \times C_f \quad [24] \text{ (6)}$$

Donde

P = Presión de cálculo expresada en Pa (N/m²).

ρ = Densidad del aire expresada en kg/m³ (En general, se puede adoptar 1.25 kg/m³).

C_e = Coeficiente de entorno/altura (Coeficiente de corrección C_e, Fig. 25).

C_f = Coeficiente de forma (Determinación de factor de forma, Fig. 24).

Tabla 10
Coeficiente de forma C_f

CONSTRUCCIÓN	BARLOVENTO	SOTAVENTO
Superficies verticales de edificios	+0.8	
Anuncios, muros aislados, elementos con dimensión corta en el sentido del viento	+1.5	
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección circular y elíptica	+0.7	
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección cuadrada o rectangular	+2.0	
Arcos y cubiertas cilíndricas con un ángulo de inclinación que no exceda los 45°	+0.8	-0.5
Superficies inclinadas a 15° o menos	+0.3 a 0	-0.6
Superficies inclinadas entre 15° y 60°	+0.3 a +0.7	-0.6
Superficies inclinadas entre 60° y la	+0.8	-0.6

vertical

Fuente: [24]

La velocidad instantánea máxima del viento tomada a 10 m con respecto al terreno es de 21 m/s (75.6 km/h) y se multiplicará por un coeficiente de corrección **C_e** que depende de la altura y de las características topográficas del terreno (nivel de exposición al viento), de acuerdo con la tabla 11 [25], la velocidad del viento en Quito es de 14,46 m/s.

Tabla 11
Coeficiente de corrección C_e

ALTURA (m)	SIN OBSTRUCCIÓN (Categoría A)	OBSTRUCCIÓN BAJA (Categoría B)	ZONA EDIFICADA (Categoría C)
5	0.91	0.86	0.80
10	1.00	0.90	0.80
20	1.06	0.97	0.88
40	1.14	1.03	0.96
80	1.21	1.14	1.06
150	1.28	1.22	1.15

Fuente: [25]

En base a los datos obtenidos de las tablas mostradas se procede a encontrar la presión que va a ejercer el viento en el panel fotovoltaico a partir de la fórmula 6 [25]:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times C_e \times C_f$$

$$P = 176.4 \frac{N}{m^2}$$

Entonces la fuerza ejercida por el viento en el panel FV de área = 0.67 m² será:

$$F_l = P \times A \quad [16] \quad (7)$$

$$F_1 = 176.4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 0.67 \text{m}^2$$

$$F_1 = 118 \text{N}$$

3.2.2. Fuerza producida por el panel FV

La carga producida por el peso del panel 8 kg ver Tabla 9, se obtendrá de la siguiente manera:

$$F_2 = m \times g \quad [16] (8)$$

$$F_2 = 8 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_2 = 78.4 \text{ N}$$

3.2.3. Fuerza producto del mantenimiento

En este caso la fuerza se establece como una carga de 10 kg, producida por una persona que se apoye en el panel, este dato se sacó de un ensayo empírico.

Entonces la carga aplicada al área del panel será:

$$F_3 = m \times g$$

$$F_3 = 10 \text{kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_3 = 98 \text{N}$$

3.2.4. Fuerza producida por el peso de la estructura

El peso de la estructura que soporta al panel con sus respectivos contrapesos es de 19.5 kg, este dato se obtuvo del programa Autodesk Inventor.

$$F_4 = m \times g$$

$$F_4 = 19.5 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_4 = 191 \text{ N}$$

Entonces la fuerza total que debe soportar la estructura es la suma de todas las fuerzas:

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad [16] (9)$$

$$F_T = 118\text{N} + 78.4\text{N} + 98\text{N} + 191\text{N}$$

$$F_T = 485.4\text{N}$$

3.3. Diseño de estructura base de panel FV

Para la sujeción del panel se hace uso de una estructura tipo H, que va ubicada en la parte posterior del mismo, esta estructura servirá de soporte para ensamblar el panel con el resto de partes del seguidor.

Las escuadras laterales están sujetas al panel mediante pernos M6 de acero inoxidable, la función de estos pernos es únicamente evitar el deslizamiento del panel.

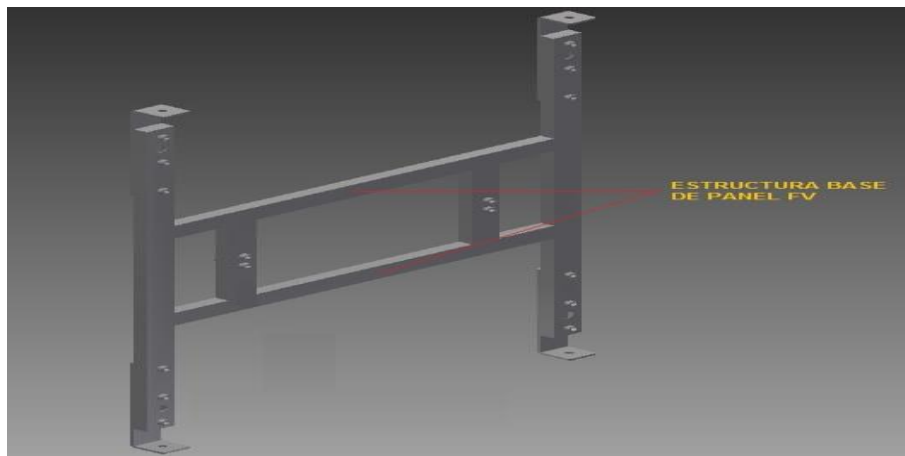


Fig. 24. Estructura Base de Panel. Elaborado por: Robinson Tapia

Con los datos obtenidos referente a las fuerzas que actúan en el sistema se procede a realizar los cálculos de momento flector máximo, para eso se indicará la carga total a la que está sometido la base.

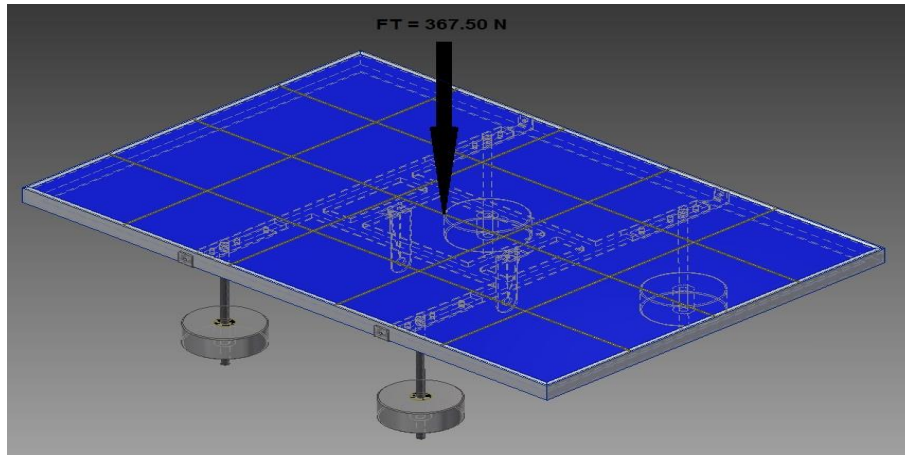


Fig. 25. Fuerza aplicada. Elaborado por: Robinson Tapia

Para empezar el desarrollo, se analiza las cargas en la posición más crítica del panel, es decir totalmente horizontal. Además uno de los extremos del panel estará sometido a una mayor carga debido a la fuerza generada por el mantenimiento. Se procede a realizar un diagrama de análisis de cargas y las medidas en la que actúa cada una de ellas.

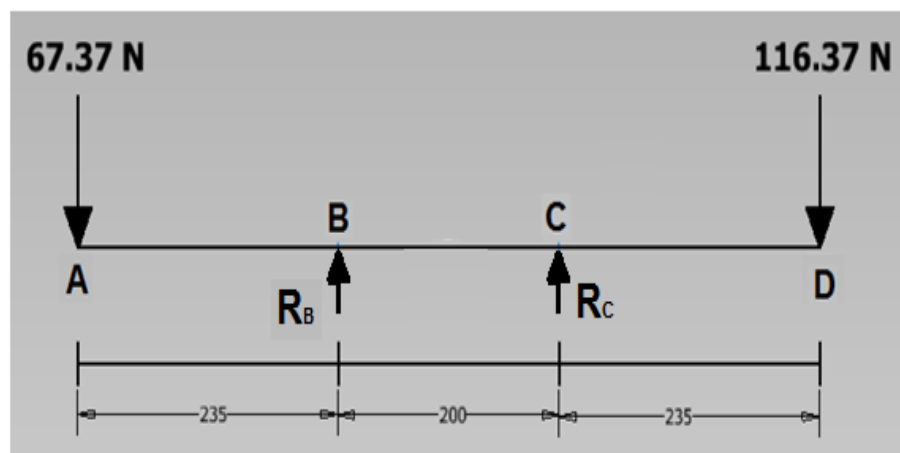


Fig. 26. Análisis de cargas. Elaborado por: Robinson Tapia

Una vez realizado el gráfico se procede a realizar el cálculo de las fuerzas conociendo las longitudes antes descritas:

$$\begin{aligned}
 +\circlearrowleft \sum M_B &= 0 & [16] \quad (10) \\
 (67.37 \text{ N} \times 0.235 \text{ m}) + (R_C \times 0.2 \text{ m}) - (116.37 \text{ N} \times 0.435 \text{ m}) &= 0 \\
 R_C &= 173.95 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$+\uparrow \sum F_Y = 0 \quad [16] (11)$$

$$-67.37 \text{ N} + R_B + 173.95 \text{ N} - 116.37 \text{ N} = 0$$

$$R_B = 9.79 \text{ N}$$

$$+\circlearrowleft M_C = F_D + d_{CD} \quad [16] (12)$$

$$M_C = -116.37 \text{ N} \times 0.235 \text{ m}$$

$$M_C = -27.34 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$+\circlearrowleft M_B = F_A + d_{AB}$$

$$M_C = 67.37 \text{ N} \times (-0.235 \text{ m})$$

$$M_C = -15.83 \text{ N} \cdot \text{m}$$

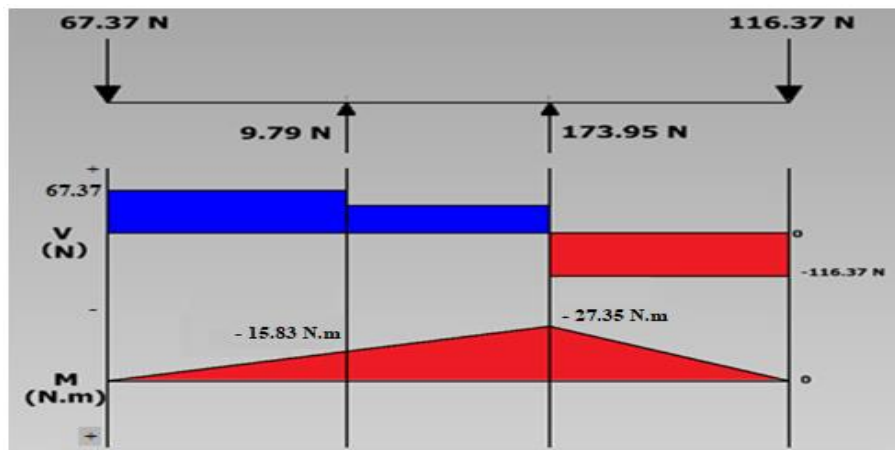


Fig. 27. Momento flector máximo. Elaborado por: Robinson Tapia

La comprobación de los resultados obtenidos se la realiza con la ayuda del software SAP2000 V16, a continuación se muestra la simulación realizada:

Primero, se procede a realizar dos casos de carga a los que se someterá la estructura base del panel, estos se indican a continuación:

Caso_1: fuerzas que actúan; fuerza producida por el peso del panel y fuerza producida por el peso de la estructura.

Caso_2: fuerzas que actúan; fuerza producida por el peso del panel, fuerza producida por el peso de la estructura y fuerza producto del mantenimiento.

En la simulación intervendrán los dos casos de carga y para los cálculos se tomará como referencia los resultados obtenidos del caso 2, que es el más crítico. Ya que se adiciona la fuerza producto del mantenimiento.

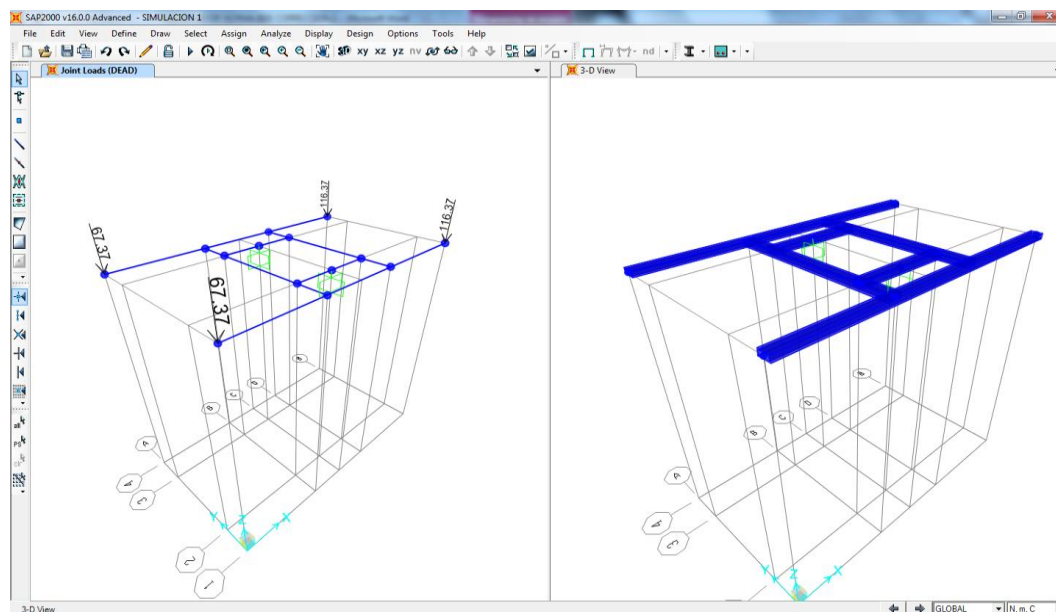


Fig. 28. Geometría cargada y cargas asignadas. Elaborado por: Robinson Tapia

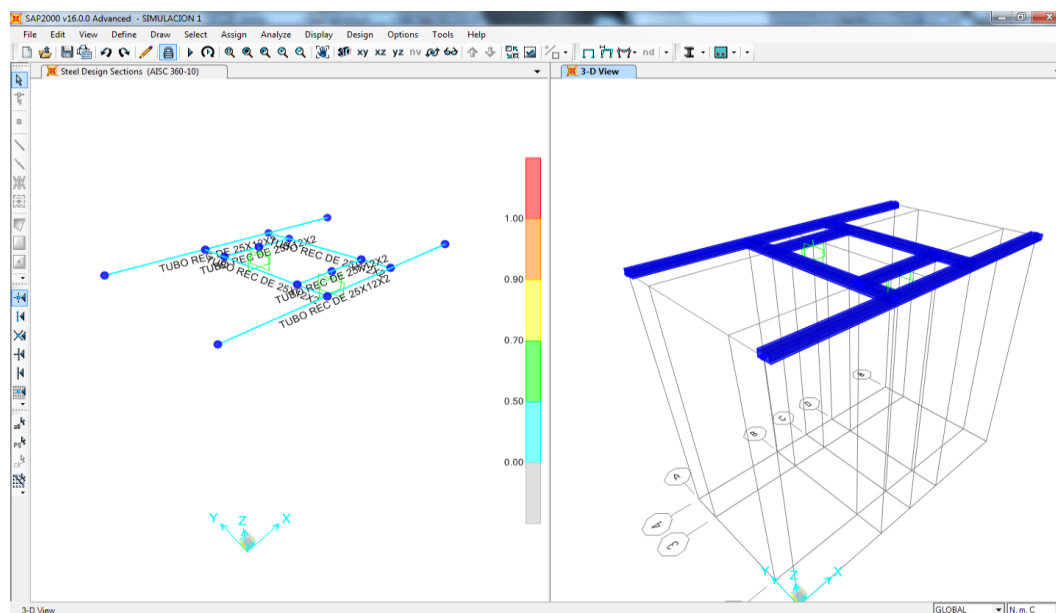


Fig. 29. Simulación realizada análisis de secciones. Elaborado por: Robinson Tapia

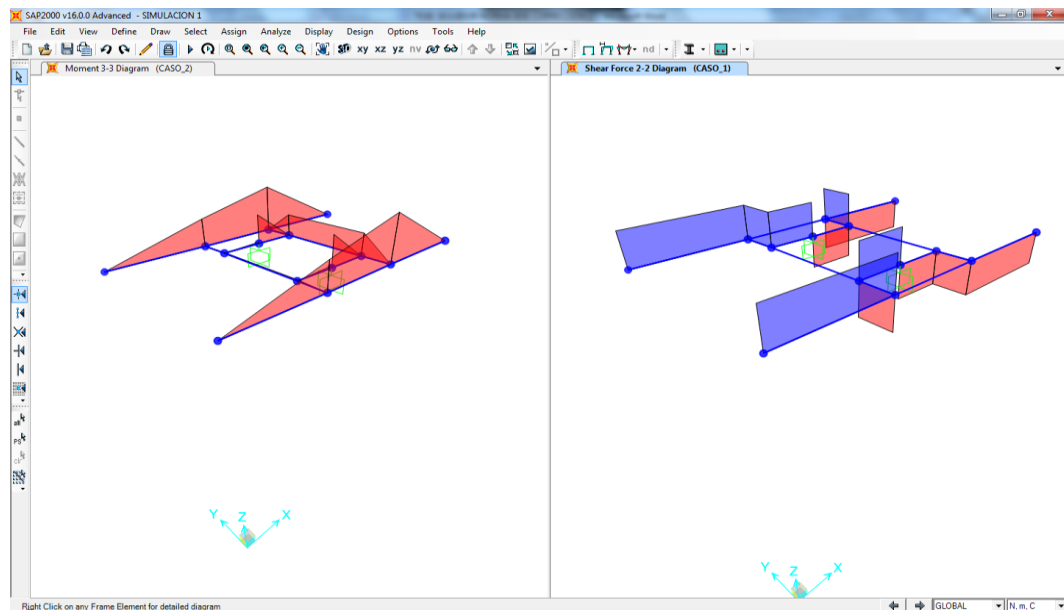


Fig. 30. Resultados obtenidos diagramas de Momento y Corte. Elaborado por: Robinson Tapia

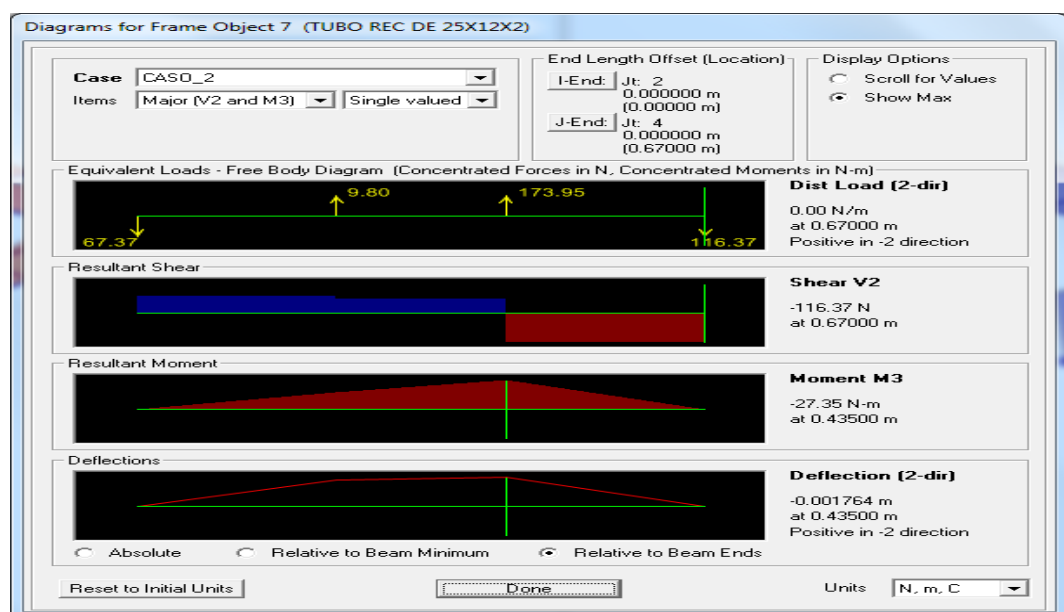


Fig. 31. Diagrama de Momento, Corte y Deflexión. Elaborado por: Robinson Tapia

Como se puede observar las reacciones y momentos calculados coinciden con los datos entregados por el programa SAP2000 V16, de esta manera se ha realizado la comprobación de los mismos.

A continuación se procede a identificar el factor de seguridad, se toma como referencia la Tabla 12, donde indica que factor se puede usar conociendo ciertas condiciones.

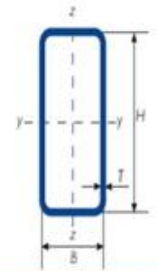
Tabla 12
Factor de seguridad y circunstancias en las cuales se usan

Conocimiento de las cargas	Conocimiento del esfuerzo	Conocimiento del entorno	Conocimiento del material	Factor de seguridad
Determinación precisa	Determinación precisa	Condiciones controladas	Muy conocido	1.25 – 1.5
Determinado fácilmente	Determinado fácilmente	Razonablemente constante	Muy conocido	1.5 – 2.0
Determinable	Determinable	Ordinario	Promedio	2.0 – 2.5
Promedio	Promedio	Promedio	Menos probado	2.5 – 3.0
Promedio	Promedio	Promedio	No probado	3.0 – 4.0
Incierto	Incierto	Incierto	Mejor conocido	3.0 – 4.0

Fuente: [16]

De la información obtenida referente al factor de seguridad, se toma como factor de seguridad el valor de 2, de aquí en adelante se usará este factor de seguridad para el desarrollo del proyecto [16, p. 25].

Con la información que se tiene referente al perfil utilizado en la simulación, se revisa el momento de inercia del perfil rectangular de 25x15x1.5mm de espesor, como se muestra en la Figura 32.



Gama perfil tubular - rectangular

DIMENSION ESPECIFICA DE LADOS		ESPEJOR ESPECIFICO	MASA LINEAL	AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL	MOMENTO DE INERCIA		RADIO DE GIRO		MÓDULO ELÁSTICO		MÓDULO PLÁSTICO		MOMENTO DE INERCIA DE TORSIÓN	MÓDULO DE TORSIÓN	SUPERFICIE LATERAL POR UNIDAD DE LARGO	LARGO NOMINAL POR TONELADA	ÁREA SUPERFICIE EXTERIOR POR METRO
H	B	T	M	A	I _{xx}	I _{yy}	i _{xx}	i _{yy}	W _{elxx}	W _{ely}	W _{plxx}	W _{ply}	I _t	C _t	A _s		A _{sv}
mm	mm	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	cm	cm	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ³	m ² /m	m	m ²
25	15	1,5	0,826	1,05	0,802	0,356	0,873	0,582	0,642	0,475	0,821	0,572	0,845	0,811	0,075	1,211	711
25	15	2	1,05	1,34	0,953	0,418	0,844	0,559	0,763	0,558	1,01	0,698	1,03	0,964	0,073	953	547
25	15	2,5	1,25	1,59	1,05	0,458	0,815	0,537	0,844	0,610	1,15	0,793	1,17	1,07	0,071	802	449
25	15	3	1,42	1,81	1,11	0,478	0,784	0,514	0,888	0,637	1,25	0,861	1,26	1,13	0,070	704	385

Fig. 32. Tabla de perfiles rectangulares de acero inoxidable, Fuente: [26]

$$I = 0.356 \text{ cm}^4$$

Con los datos obtenidos del Momento de inercia y Momento flector, se procede a calcular el Esfuerzo de trabajo.

$$\sigma_{\text{tra}} = \frac{M \times c}{I} \quad [16] \quad (13)$$

C = Distancia (y) desde el eje neutro

$$\sigma_{\text{tra}} = \frac{27.35 \text{ N} \cdot \text{m} \times 0.0125 \text{ m}}{0.00000000356 \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{\text{tra}} = 96 \text{ MPa}$$

A continuación se procede a realizar el cálculo referente al Esfuerzo permisible, se hace uso del factor de seguridad que se escogió en la Tabla 12.

$$n = \frac{\sigma_u}{\sigma_{\text{perm}}} \quad [16] \quad (14)$$

$$\sigma_{\text{perm}} = \frac{\sigma_u}{n}$$

$$\sigma_{\text{perm}} = \frac{206 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma_{\text{perm}} = 103 \text{ MPa}$$

Se realiza la comparación de los resultados obtenidos del esfuerzo de trabajo y esfuerzo permisible como se indica:

$$\sigma_{\text{tra}} \leq \sigma_{\text{per}}$$

$$96 \text{ MPa} \leq 103 \text{ Mpa}$$

Como se puede observar el Esfuerzo de Trabajo es menor que el Esfuerzo permisible concluyendo que el perfil seleccionado está trabajando dentro del rango permitido.

El perfil seleccionado para la construcción de la base que sujeta al panel es un tubo rectangular de acero inoxidable 304, ya que trabajará a la intemperie y se necesita que tenga alta resistencia a la corrosión; con las siguientes dimensiones: 25 mm × 15 mm × 1.5 mm de espesor.



Fig. 33. Estructura base para sujetar panel FV. Elaborado por: Robinson Tapia

3.4. Diseño de brazos para sujeción de la base del panel

Para la sujeción de la estructura base del panel se hace uso de dos escuadras, las mismas que estarán sujetas a la transmisión por un lado y por el otro lado sujetarán a la base del panel.

Cada una de estas escuadras estará ubicada en el centro de la base que sujeta el panel, es decir que el panel constará de dos puntos de apoyo. Cada escuadra estará sometida a un momento flector generado por la fuerza aplicada, que para este caso será: la producida por la acción del viento, por el peso propio del panel, por el peso de la estructura y la fuerza producida por el mantenimiento en la Figura 34. se muestra la ubicación de las escuadras con respecto al panel.

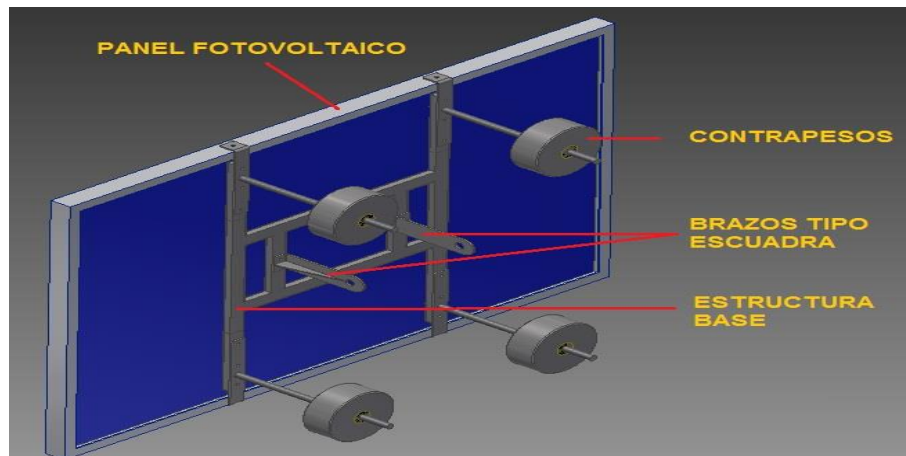


Fig. 34. Brazos tipo escuadra. Elaborado por: Robinson Tapia

Como ya se calculó anteriormente las fuerzas ejercidas en el mecanismo, se procede a ubicar cada una de ellas en su respectivo eje de acción. En la figura 35 se muestra el eje de acción de las fuerzas en el elemento mencionado:

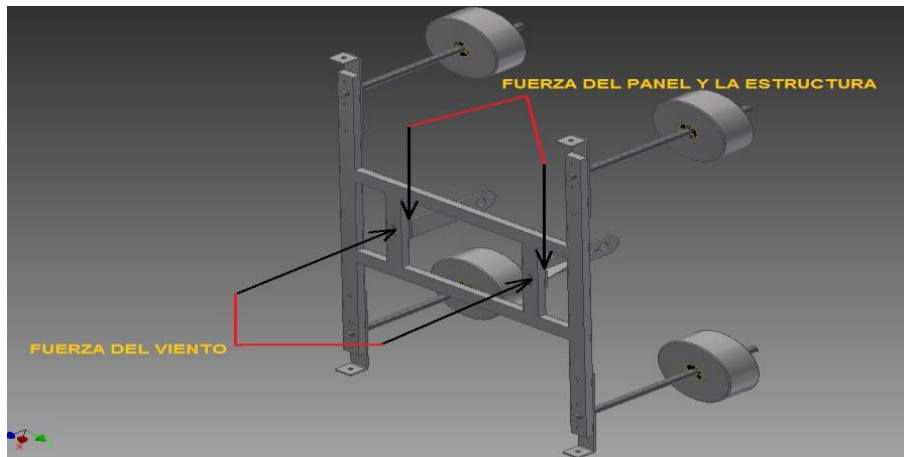


Fig. 35. Fuerzas aplicadas. Elaborado por: Robinson Tapia

Ahora bien, si los brazos que sujetan la estructura base del panel tienen una longitud de 150 mm, se procede a calcular el momento que se genera, tomando en cuenta el caso más crítico que es cuando el panel forma 90° con respecto a la horizontal (suelo).

Seguidamente, se procede a realizar un diagrama de análisis de cargas, la ubicación en la que cada fuerza actúa y finalmente la ubicación del punto de sujeción, para este caso se analizará como una viga en voladizo.

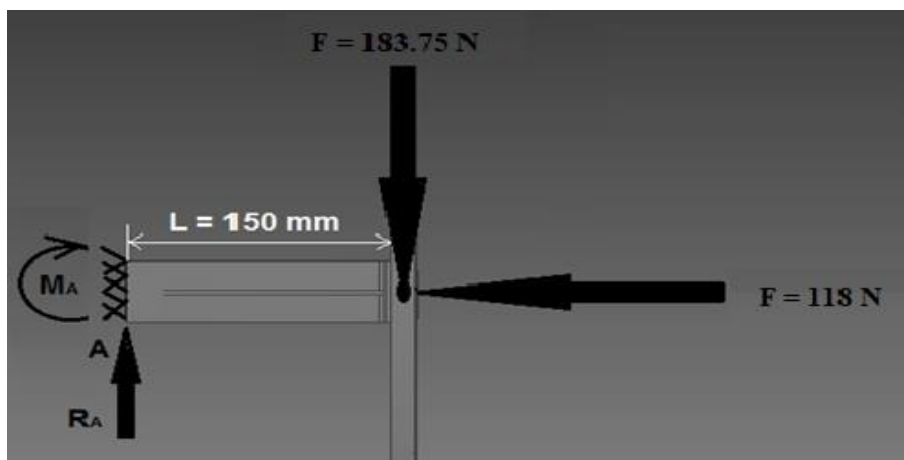


Fig. 36. Análisis de cargas. Elaborado por: Robinson Tapia

Una vez realizado el gráfico se procede con el cálculo conociendo las longitudes y fuerzas aquí descritas:

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F_Y &= 0 \\
 -183.75 \text{ N} + R_A &= 0 \\
 R_A &= 183.75 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$+\circlearrowleft \sum M_A = 0$$

$$M_A + (183.75 \text{ N} \times 0.15 \text{ m}) = 0$$

$$M_A = -27.56 \text{ N} \cdot \text{m}$$

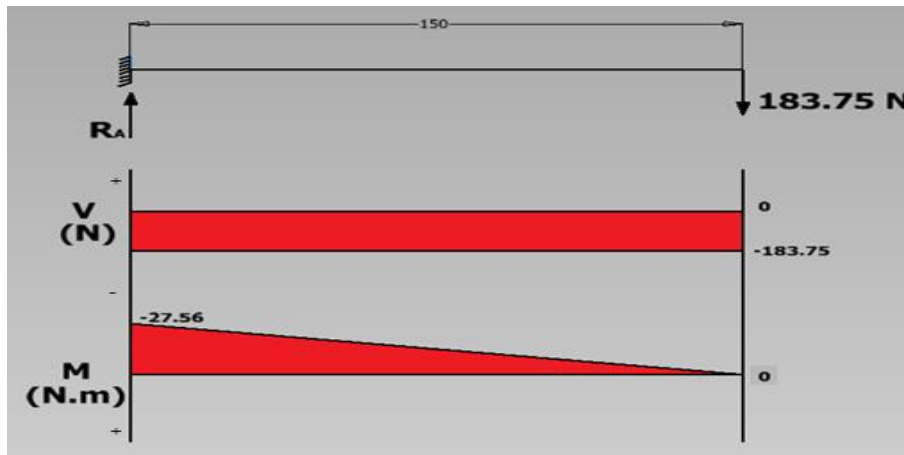


Fig. 37. Momento flector máximo. Elaborado por: Robinson Tapia

La comprobación de los resultados obtenidos se la realiza con la ayuda del software SAP2000 V16, a continuación se muestra la simulación realizada.

Primero, se procede a realizar dos casos de carga a los que se someterá los brazos que sujetan la estructura y el panel, estos se indican a continuación:

Caso_1: fuerzas que actúan; fuerza producida por el peso del panel, fuerza producida por el peso de la estructura y la fuerza producto del mantenimiento.

Caso_2: fuerzas que actúan; fuerza producida por el peso del panel, fuerza producida por el peso de la estructura, fuerza producto del mantenimiento y la fuerza producida por el viento.

En la simulación intervendrán los dos casos de carga y para los cálculos se tomará como referencia el caso 2, por tener adicionada la carga de viento.

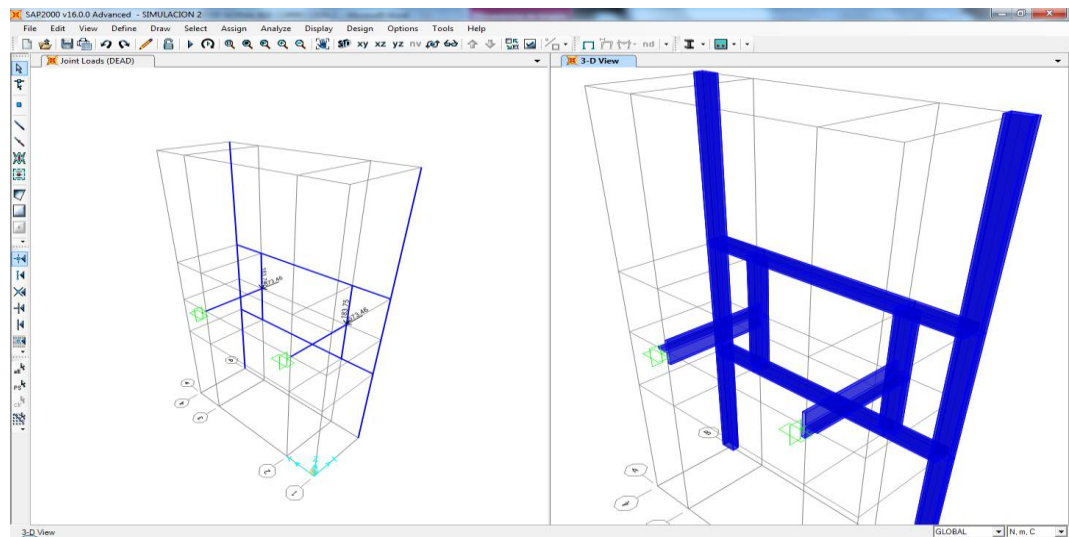


Fig. 38. Geometría cargada y cargas asignadas. Elaborado por: Robinson Tapia

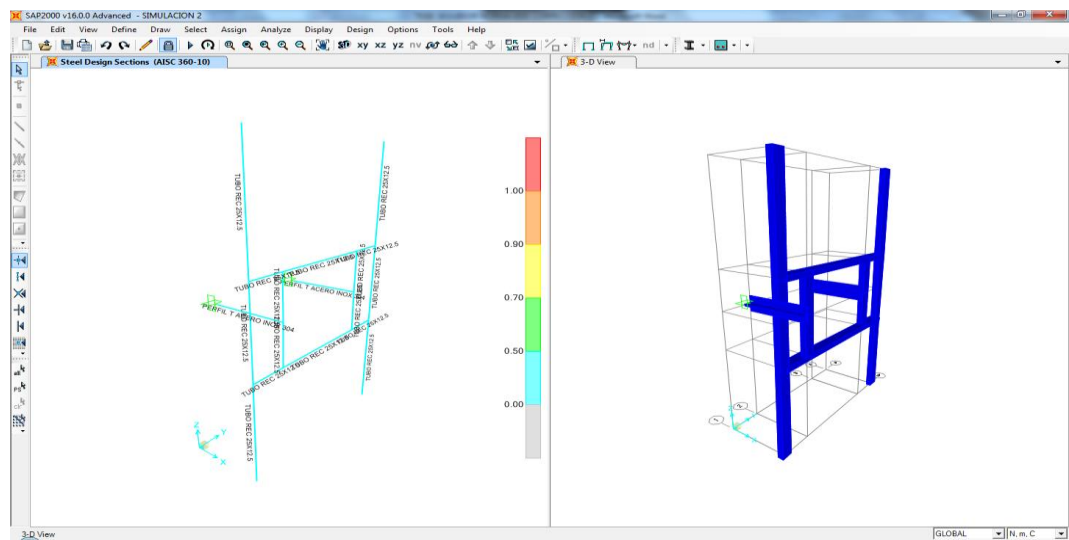


Fig. 39. Simulación realizada del análisis de sección. Elaborado por: Robinson Tapia

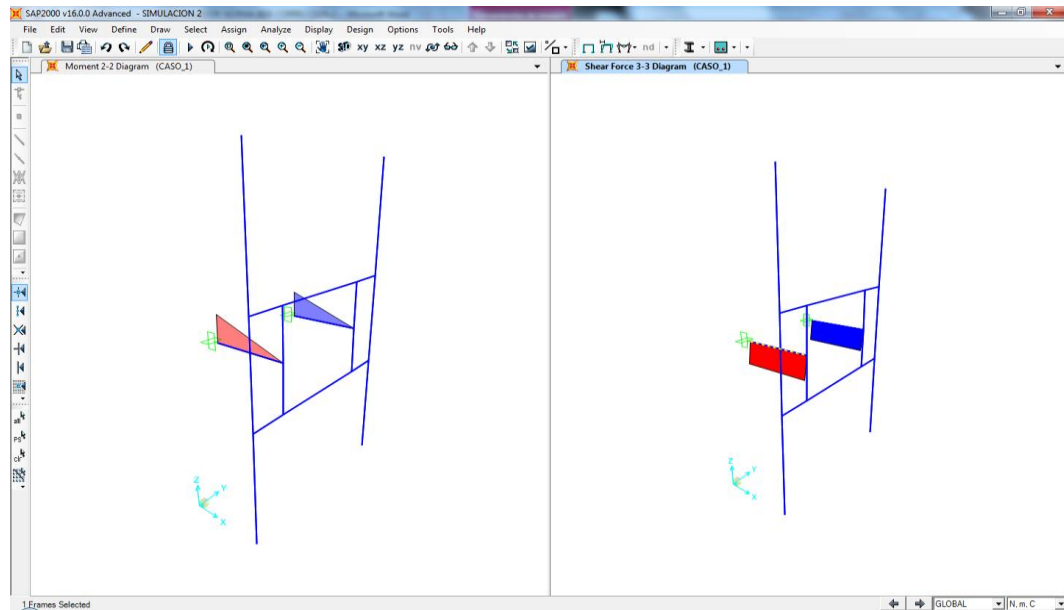


Fig. 40. Resultados obtenidos de Momento y Corte. Elaborado por: Robinson Tapia

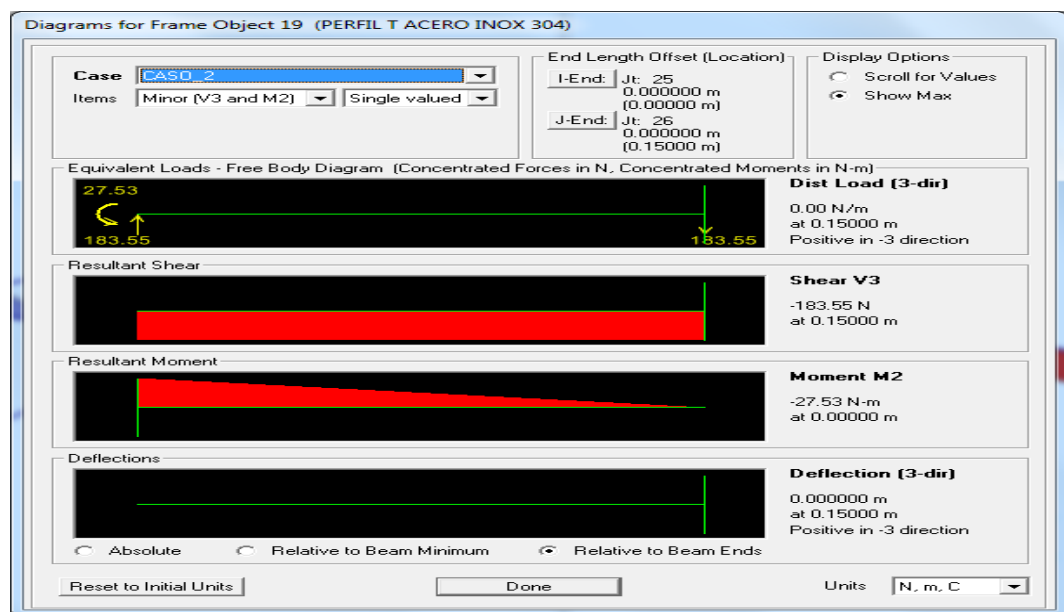


Fig. 41. Diagrama de Momento, Corte y Deflexión. Elaborado por: Robinson Tapia

Aquí se puede observar, que las cargas y momentos calculados coinciden con los datos entregados por el programa SAP2000 V16, referentes a momento flector y esfuerzo cortante.

A continuación se procede con el cálculo del perfil requerido para la construcción de los brazos para sujeción de la base del panel.

Se encuentra el módulo de sección que servirá para identificar el perfil en la tabla de perfiles T que se muestra en la Figura 42.

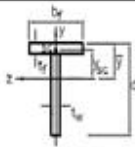
$$Z = \frac{I}{C} \quad [16] \quad (15)$$

$$Z = \frac{7.07 \text{ cm}^4}{3.16 \text{ cm}}$$

$$Z = 2.53 \text{ cm}^3$$

$$Z = 0.136 \text{ pulg}^3$$

Se busca en las tablas de perfiles de acero inoxidable el que se pueda utilizar partiendo del valor obtenido, por construcción se escoge un perfil (T).



Shape		Web		Flange		Axis z-z						Axis y-y				Shear Center	Torsion Properties	
		d	t _w	b _f	t _f	A _z	I _z	Z _z	Z _z	r _z	y	A _y	I _y	Z _y	r _y	y _{sc}	J	C _w
	in. ²	in.	in.	in.	in.	in. ²	in. ⁴	in. ³	in. ³	in.	in.	in. ²	in. ⁴	in. ³	in.	in.	in. ⁴	in. ⁶
T 3/4x3/4x3/16	0.246	0.750	0.187	0.750	0.187	0.139	0.0116	0.0458	0.0235	0.218	0.254	0.119	0.0069	0.0183	0.167	0.126	0.0030	0.0001
T 1x1x3/16	0.339	1.000	0.187	1.000	0.187	0.176	0.0299	0.0941	0.0438	0.297	0.318	0.152	0.0160	0.0321	0.217	0.196	0.0042	0.0002
T 1-1/2x1	0.339	1.500	0.187	1.500	0.187	0.251	0.110	0.247	0.104	0.457	0.444	0.223	0.0533	0.0711	0.318	0.330	0.0095	0.0007
T 1-1/2x1	0.588	1.500	0.250	1.500	0.250	0.347	0.139	0.297	0.134	0.449	0.466	0.302	0.0719	0.096	0.323	0.306	0.0151	0.0015
T 1-3/4x1	0.520	1.750	0.187	1.750	0.187	0.289	0.179	0.353	0.144	0.537	0.506	0.259	0.0844	0.096	0.369	0.395	0.0075	0.0011

Fig. 42. Tabla de perfiles tipo T. Fuente: [27]

Con los datos obtenidos del Módulo de sección y Momento flector, se procede a calcular el Esfuerzo de trabajo.

$$\sigma_{\text{tra}} = \frac{M}{Z} \quad [16] \quad (16)$$

Z = Módulo de sección

$$\sigma_{\text{tra}} = \frac{27.53 \text{ N} \cdot \text{m}}{0.00000222 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_{\text{tra}} = 12.40 \text{ Mpa}$$

$$12.40 \text{ MPa} \leq 103 \text{ Mpa}$$

Se observa que el Esfuerzo de Trabajo, es menor que el Esfuerzo permisible, concluyendo que el perfil seleccionado está trabajando dentro del rango permitido.

El perfil seleccionado para la construcción de los brazos que sujetan la estructura del panel es un perfil T de acero inoxidable 304, ya que trabajará a la intemperie y se necesita que tenga alta resistencia a la corrosión, con las siguientes dimensiones: 45 mm × 20 mm × 4.76 mm de espesor.



Fig. 43. Brazos para la sujeción de la estructura del panel FV. Elaborado por: Robinson Tapia

3.5. Diseño del eje de giro horizontal

Este eje será el encargado de soportar toda la estructura que sujeta al panel y también es el que permitirá que el sistema gire en el eje de latitud o eje Cenit, para realizar el cálculo se parte de la longitud del eje que será de 0.244 m, a continuación se indica la ubicación del elemento mencionado.

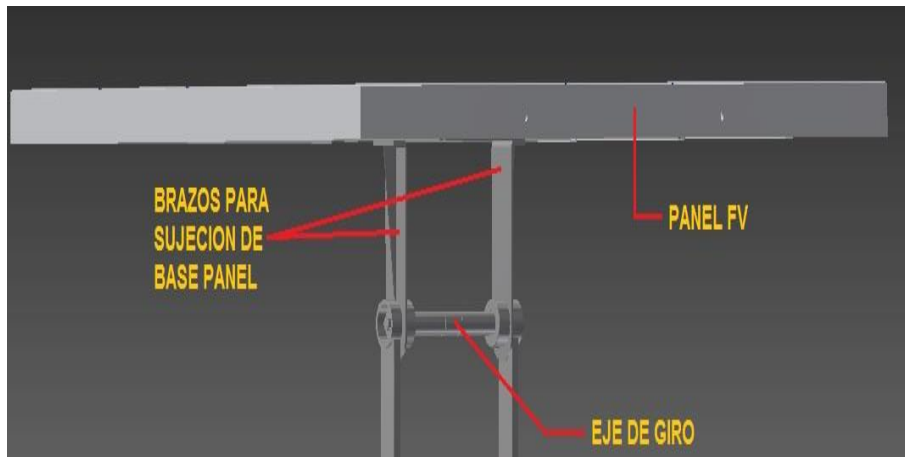


Fig. 44. Eje de giro sentido Latitud. Elaborado por: Robinson Tapia

Ahora se realiza un diagrama para identificar en que puntos se aplicarán las cargas y la magnitud de cada una de estas.

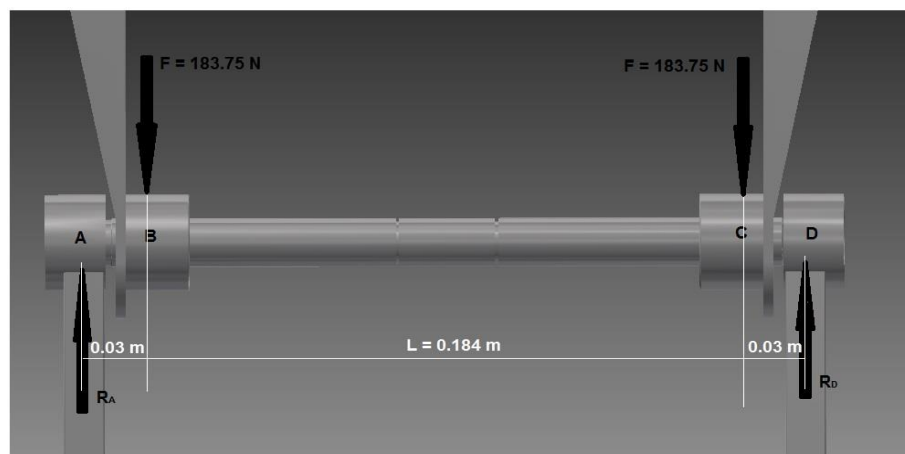


Fig. 45. Análisis de cargas. Elaborado por: Robinson Tapia

Una vez realizado el gráfico se hace el cálculo conociendo las longitudes y fuerzas aquí descritas.

$$\begin{aligned}
 +\circlearrowleft \sum M_A &= 0 \\
 (-183.75 \text{ N} \times 0.03 \text{ m}) + (-183.75 \times 0.214 \text{ m}) + (R_D \times 0.244 \text{ m}) &= 0 \\
 R_D &= 183.75 \text{ N} \\
 +\uparrow \sum F_Y &= 0 \\
 R_A - 183.75 \text{ N} - 183.75 \text{ N} + 183.75 \text{ N} &= 0 \\
 R_A &= 183.75 \text{ N}
 \end{aligned}$$

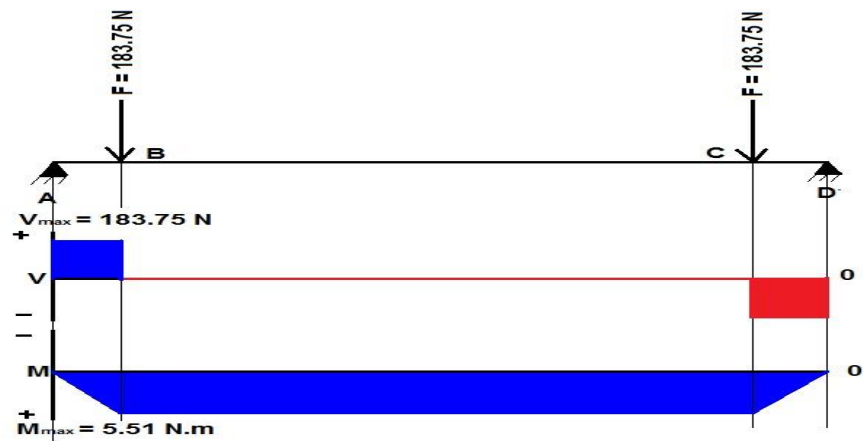


Fig. 46. Diagrama de momento y corte. Elaborado por: Robinson Tapia

La comprobación de los resultados obtenidos se la realiza con la ayuda del software SAP2000 V16, a continuación se muestra la simulación realizada:

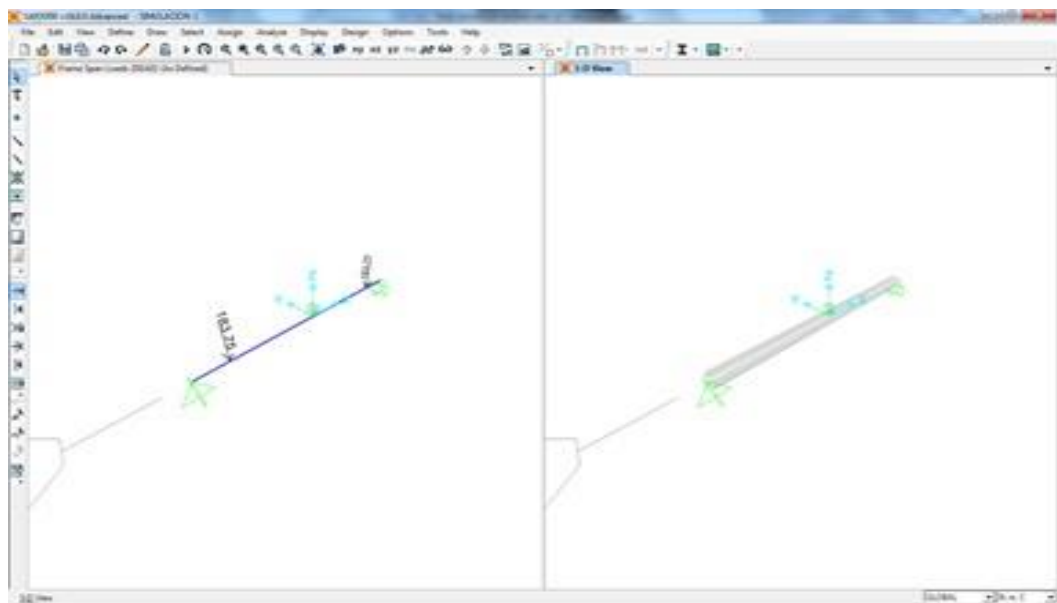


Fig. 47. Geometría cargada y cargas asignadas. Elaborado por: Robinson Tapia

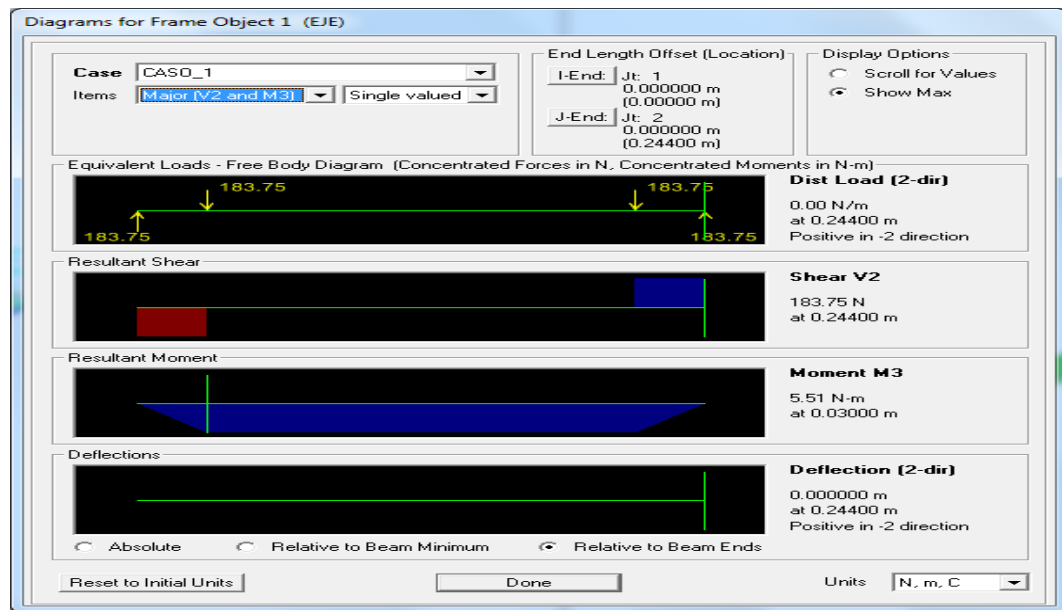


Fig. 48. Diagrama de Momento, Corte y Deflexión. Elaborado por: Robinson Tapia

Como se puede observar las cargas y momentos calculados coinciden con los datos entregados por el programa SAP2000 V16, referentes a momento flector y esfuerzo cortante.

A continuación se procede con el cálculo del material requerido para la construcción del eje de giro de la base del panel FV.

Ahora se calcula el diámetro del eje que se pueda utilizar:

$$\frac{I}{c} = \frac{\pi \times d^3}{64} \quad [16, p. 118] \quad (17)$$

$$\frac{I}{c} = 0.049 d^3$$

$$\sigma = \frac{M}{I/c}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{M}{\sigma \times 0.049}} \quad [16](18)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{5.51 \text{ N} \cdot \text{m}}{1.03 \times 10^8 \text{ Pa} \times 0.049}}$$

$$d = \sqrt[3]{0.00000109 \text{ m}^3}$$

$$d = 0.010 \text{ m}$$

$$d = 10 \text{ mm}$$

El material seleccionado por construcción, es un eje con las siguientes dimensiones: 16 mm de diámetro y 244 mm de largo, de acero inoxidable 304.



Fig. 49. Eje de giro horizontal. Elaborado por: Robinson Tapia

3.6. Diseño de estructura tipo U

Este elemento sujeta a toda la estructura del panel y también sirve de base para el eje de giro horizontal, permitiendo tener dos puntos de apoyo para el eje de giro por su forma en U y es en la parte inferior central, donde pivota el mecanismo total.

En sus extremos se colocarán bocines alineados en donde ingresará el eje de giro, permitiendo que este pivotee con libertad.

En la parte inferior de esta estructura se sujetará la placa base del motor reductor, a continuación se muestra el modelo mencionado.

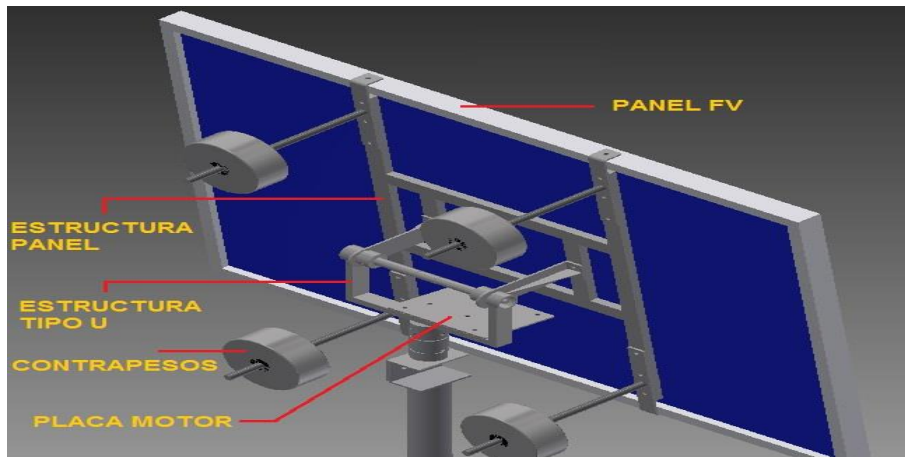


Fig. 50. Estructura tipo U. Elaborado por: Robinson Tapia

Con los datos obtenidos de la fuerza producida por el panel, producida por el peso de la estructura y sus contrapesos y producida por el mantenimiento, se realiza los cálculos referentes a momento flector máximo, para eso se indicará la carga total a la que está sometido el elemento.

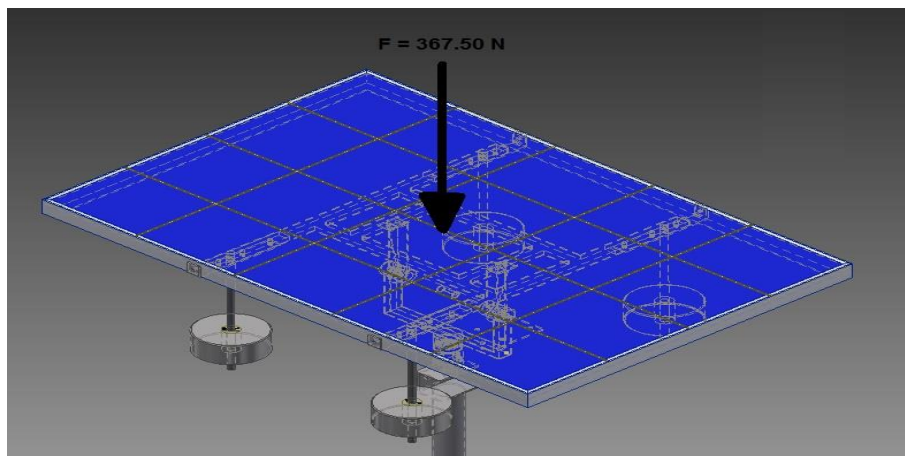


Fig. 51. Fuerza total aplicada. Elaborado por: Robinson Tapia

Para empezar el desarrollo se analiza las cargas en la posición más crítica del panel, es decir totalmente horizontal, ahora se procede a realizar un diagrama de análisis de cargas, las medidas en la que cada fuerza actúa y finalmente la ubicación del punto de sujeción.

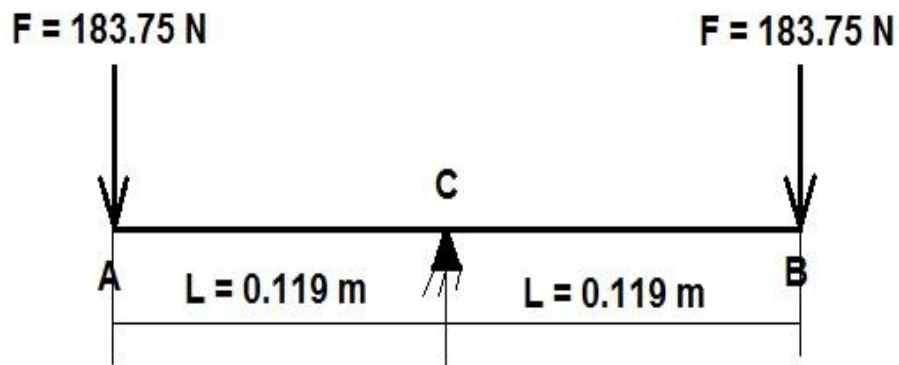


Fig. 52. Análisis de cargas. Elaborado por: Robinson Tapia

Una vez realizado el gráfico se hace el cálculo de fuerzas conociendo las longitudes aquí descritas, se toma como una viga en voladizo el tramo CB para poder encontrar el momento máximo.

$$+\uparrow \sum F_Y = 0$$

$$(-183.75 \text{ N}) + (-183.75 \text{ N}) - R_C = 0$$

$$R_C = 367.50 \text{ N}$$

$$+\circlearrowleft \sum M_C = 0$$

$$M_C + (183.75 \text{ N} \times 0.119 \text{ m}) = 0$$

$$M_C = -21.86 \text{ N} \cdot \text{m}$$

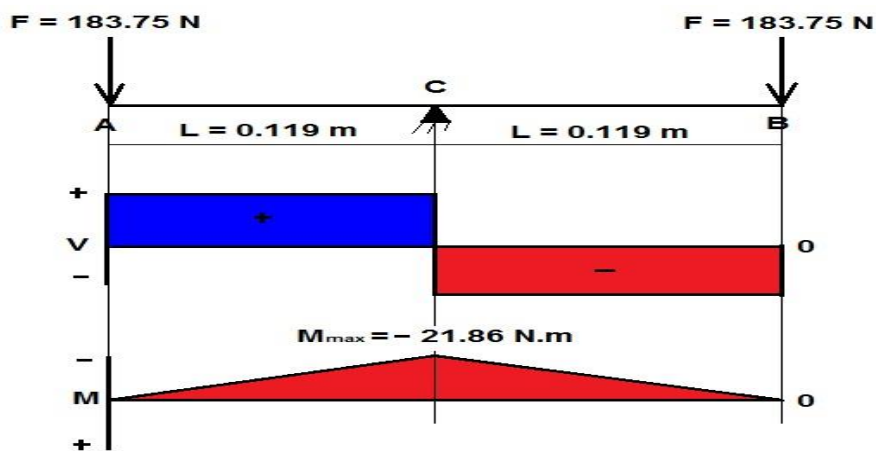


Fig. 53. Diagrama de Corte y Momento flector. Elaborado por: Robinson Tapia

La comprobación de los resultados obtenidos se la realiza con la ayuda del software SAP2000 V16, a continuación se muestra la simulación realizada.

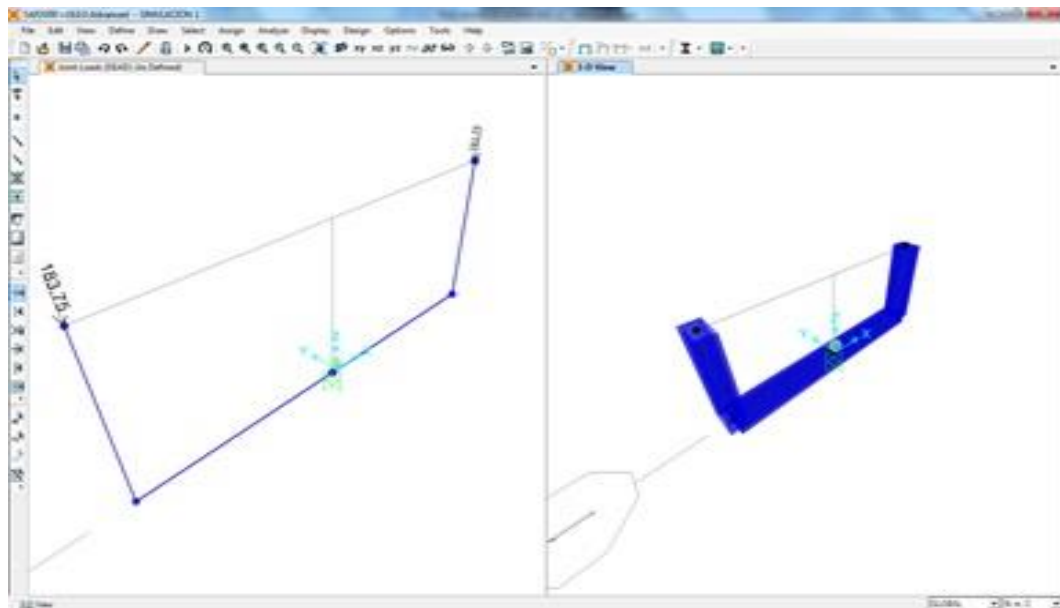


Fig. 54. Geometría cargada y cargas asignadas. Elaborado por: Robinson Tapia

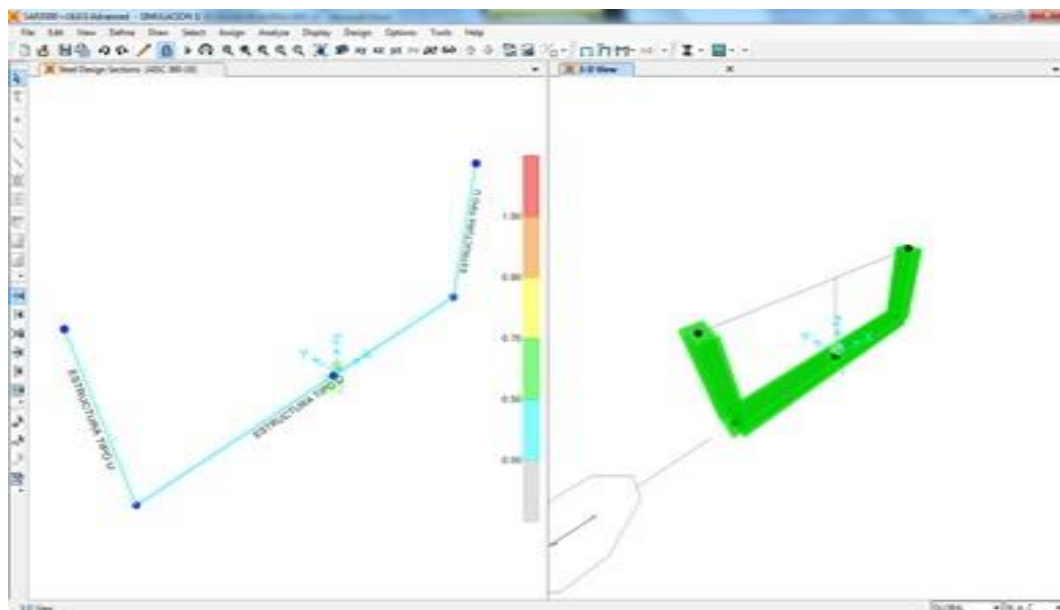


Fig. 55. Simulación realizada análisis de secciones. Elaborado por: Robinson Tapia

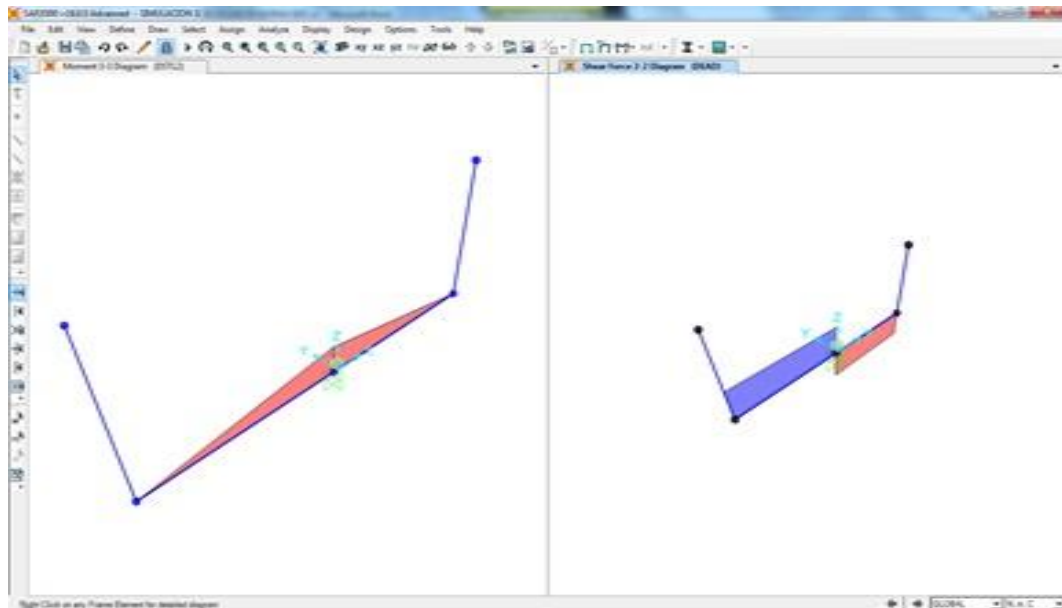


Fig. 56. Resultados obtenidos diagramas de Momento y Corte. Elaborado por: Robinson Tapia

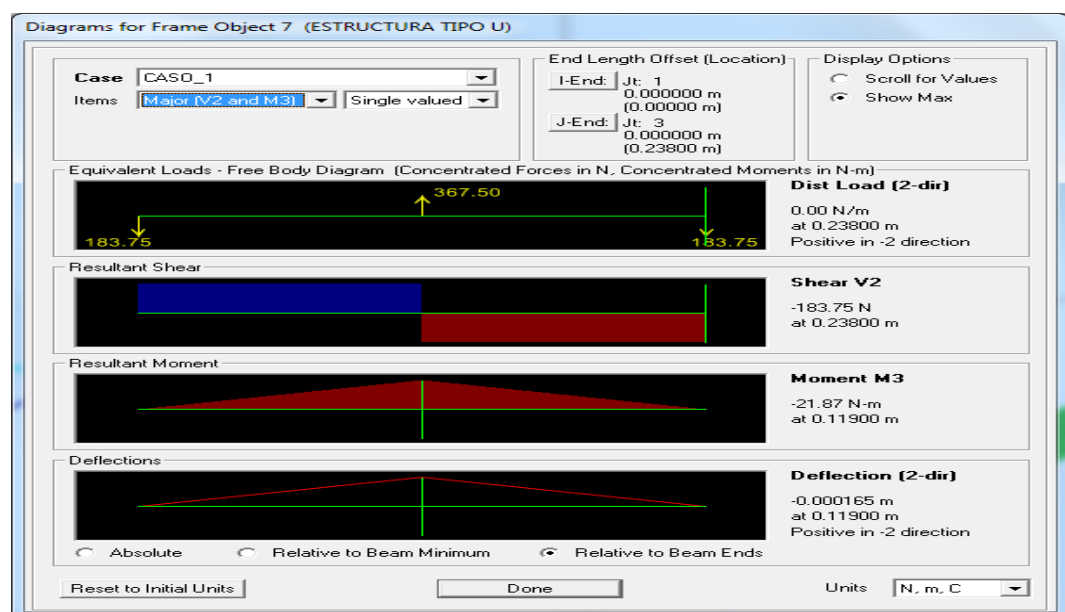
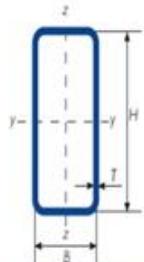


Fig. 57. Diagrama de Momento, Corte y Deflexión. Elaborado por: Robinson Tapia

Como se puede observar, las cargas y momentos calculados coinciden con los datos entregados por el programa SAP2000 V16, de esta manera se ha realizado la comprobación de los mismos, a continuación se procede con el cálculo del perfil requerido para la construcción de la estructura tipo U.

Con la información que se tiene referente al perfil utilizado en la simulación, se revisa el momento de inercia del perfil rectangular de 25x15x1.5mm de espesor, como se muestra en la Figura 58.



Gama perfil tubular - rectangular

DIMENSION ESPECIFICA DE LADOS		ESPESOR ESPECIFICO	MASA LINEAL	AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL	MOMENTO DE INERCIA		RADIO DE GIRO		MÓDULO ELÁSTICO		MÓDULO PLÁSTICO		MOMENTO DE INERCIA DE TORSION	MÓDULO DE TORSION	SUPERFICIE LATERAL POR UNIDAD DE LARGO	LARGO NOMINAL POR TONELAJADA	AREA SUPERFICIE EXTERIOR POR METRO
H	B	T	M	A	I_x	I_y	i_x	i_y	W_{elx}	W_{ely}	W_{plx}	W_{ply}	I_t	C_t	A_s		A_{se}
mm	mm	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	cm	cm	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ³	m ² /m	m	m ²
25	15	1,5	0,826	1,05	0,802	0,356	0,873	0,582	0,642	0,475	0,821	0,572	0,845	0,811	0,075	1,211	711
25	15	2	1,05	1,34	0,953	0,418	0,844	0,559	0,763	0,558	1,01	0,698	1,03	0,964	0,073	953	547
25	15	2,5	1,25	1,59	1,05	0,458	0,815	0,537	0,844	0,610	1,15	0,793	1,17	1,07	0,071	802	449
25	15	3	1,42	1,81	1,11	0,478	0,784	0,514	0,888	0,637	1,25	0,861	1,26	1,13	0,070	704	385

Fig. 58. Tabla de perfiles rectangulares de acero inoxidable, Fuente: [26]

$$I = 0.356 \text{ cm}^4$$

Con los datos obtenidos del Momento de inercia y Momento flector, se procede a calcular el Esfuerzo de trabajo.

$$\sigma_{tra} = \frac{M \times c}{I} \quad [16] \quad (19)$$

C = Distancia (y) desde el eje neutro

$$\sigma_{tra} = \frac{21.87 \text{ N} \cdot \text{m} \times 0.0125 \text{ m}}{0.00000000356 \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{tra} = 76 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{tra} \leq \sigma_{per}$$

$$76 \text{ MPa} \leq 103 \text{ MPa}$$

Como se puede observar, el Esfuerzo de Trabajo es menor que el Esfuerzo permisible, concluyendo que el perfil seleccionado está trabajando dentro del rango permitido.

El perfil seleccionado para la construcción de la base que sujeta al panel es un tubo rectangular de acero inoxidable 304, ya que trabajará a la intemperie y se necesita que tenga alta resistencia a la corrosión; con las siguientes dimensiones: 25 mm X 15 mm X 1.5 mm de espesor.



Fig. 59. Estructura tipo U. Elaborado por: Robinson Tapia

3.7. Diseño de columna base trípode

En este proyecto se busca que todo el sistema sea liviano, de fácil transporte, resistente, de fácil desmontaje de piezas y partes, por lo que a continuación se analizará un modelo de trípode, teniendo en cuenta que las dimensiones o alguna de sus partes pueden variar luego de realizar la simulación.

Se adoptó la forma trípode ya que presenta gran estabilidad al ser ubicada en superficies poco uniformes, la ubicación de cada pata está a 120° una respecto a la otra, el largo de cada pata será de 550 mm y cubrirá un área de 1 m^2 .

Las patas y la columna tienen refuerzos diagonales para aumentar su resistencia al volcamiento, cabe recalcar que toda esta base será construida en acero inoxidable ya que va a trabajar a la intemperie, esta estructura tiene que soportar todas las fuerzas que anteriormente fueron calculadas; en la Figura 60. se muestra el trípode escogido.

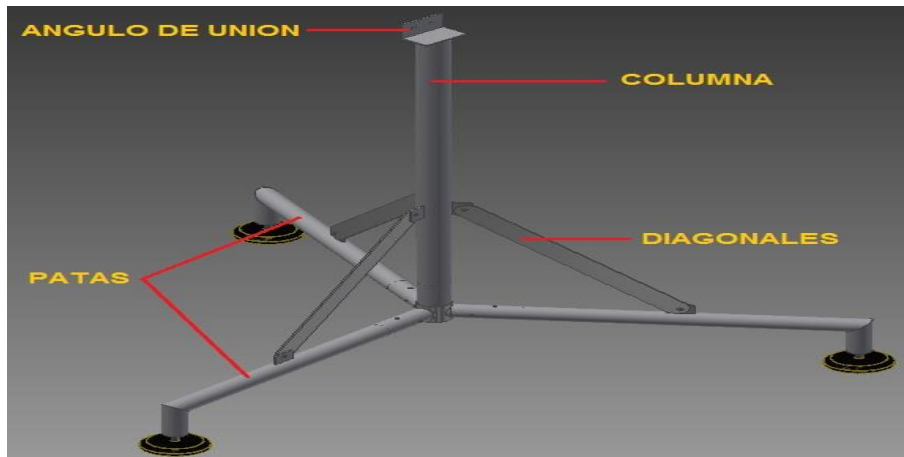


Fig. 60. Trípode. Elaborado por: Robinson Tapia

Esta estructura debe soportar cargas axiales, que son las fuerzas producidas por el panel, por el mantenimiento y por el peso de la estructura que sujeta el panel, así como también una fuerza lateral que es la fuerza producida por el viento, la misma que es transferida por el panel, tomando como el caso crítico sería: cuando el panel forma 90° con respecto a la horizontal (suelo).

El largo de la columna es de 953 mm a esto se suma el alto de las patas que son 100 mm, es decir el alto total de la estructura es de 1053 mm tomados desde el suelo hasta la parte superior de la columna. Cabe recalcar que el casos de carga al que se va a someter la estructura es el más crítico, es decir se tomará como dato el valor de la fuerza producida por el viento y en el mismo momento, se aplicará la fuerza producida por el mantenimiento cuando la posición del panel esté formando 90° con respecto a la horizontal. A continuación se muestra la ubicación de dichas fuerzas aplicadas al elemento llamado columna.

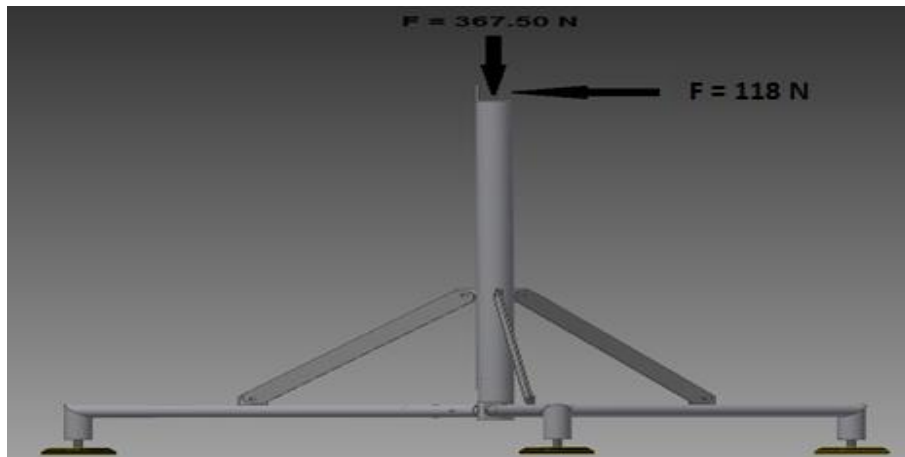


Fig. 61. Fuerzas aplicadas. Elaborado por: Robinson Tapia

Una vez realizado el gráfico se realiza el cálculo de las fuerzas conociendo las longitudes aquí descritas.

$$+\uparrow \sum F_Y = 0$$

$$-118 \text{ N} + R_A = 0$$

$$R_A = 118 \text{ N}$$

$$+\circlearrowleft \sum M_A = 0$$

$$M_A + (118 \text{ N} \times 0.45 \text{ m}) = 0$$

$$M_A = -53.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

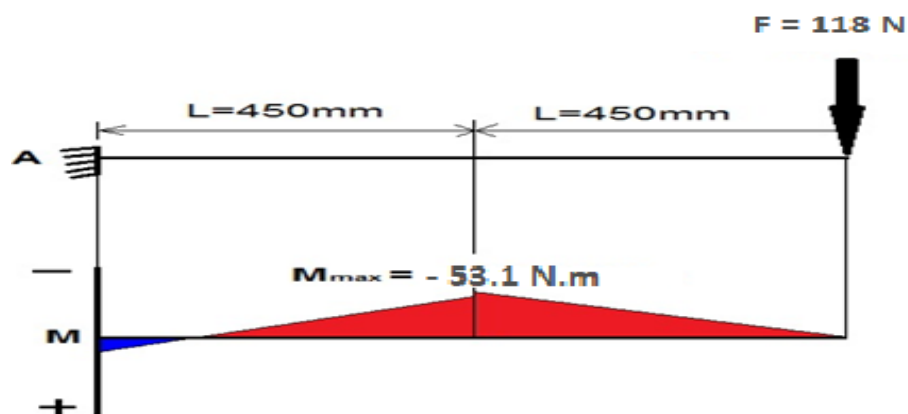


Fig. 62. Momento flector máximo. Elaborado por: Robinson Tapia

La comprobación de los resultados obtenidos se la realiza con la ayuda del software SAP2000 V16, a continuación se muestra la simulación realizada.

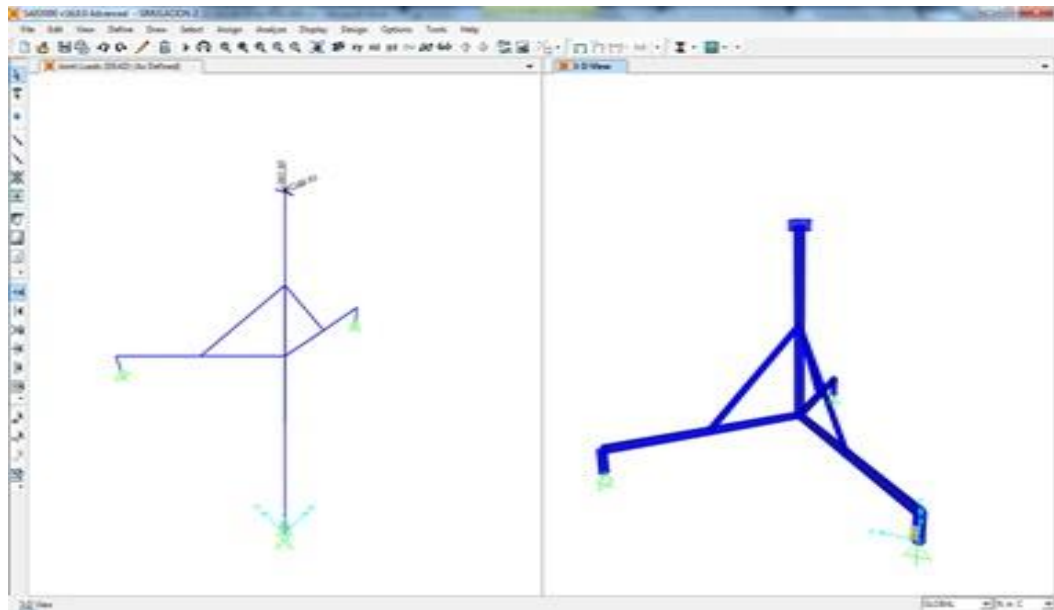


Fig. 63. Geometría cargada y cargas asignadas. Elaborado por: Robinson Tapia

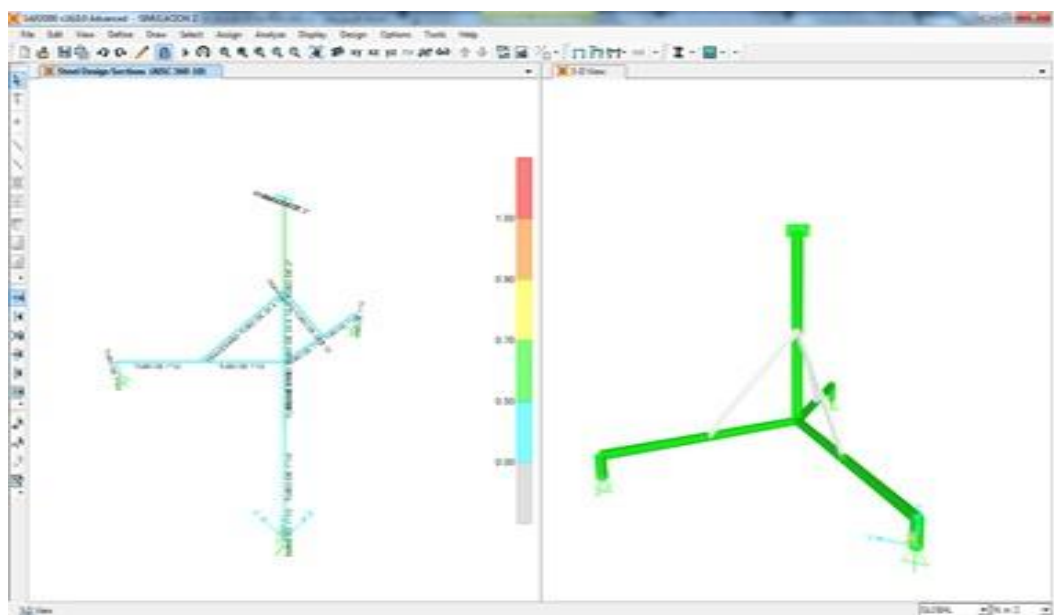


Fig. 64. Simulación realizada del análisis de sección. Elaborado por: Robinson Tapia

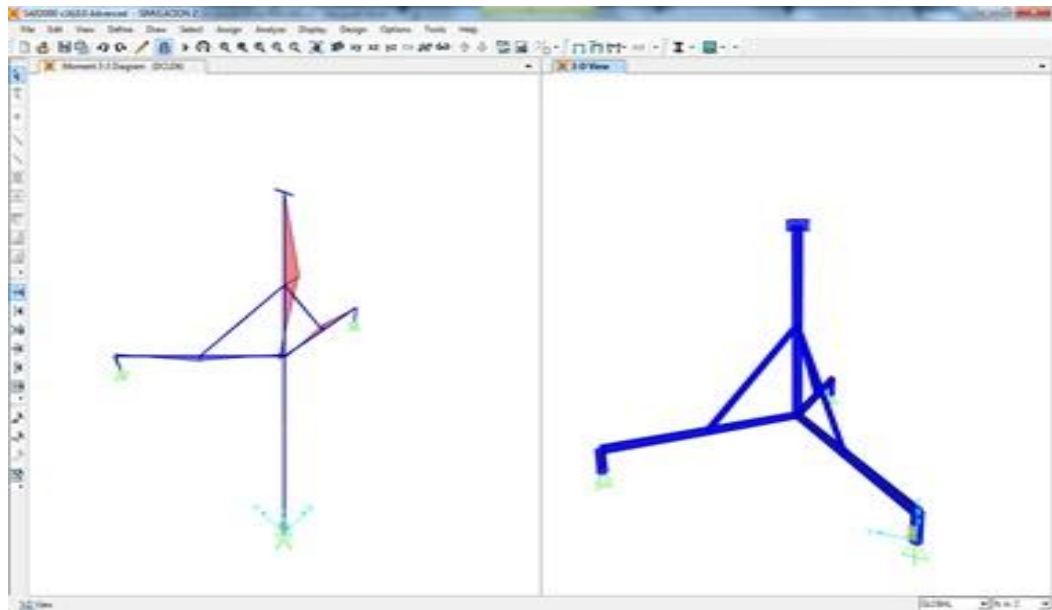
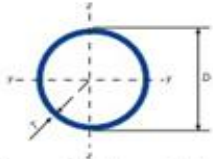


Fig. 65. Resultados obtenidos de Momento y Corte. Elaborado por: Robinson Tapia

Con la información que se tiene referente al perfil utilizado en la simulación, se revisa el momento de inercia del perfil tubular de 50 mm de diámetro x 2.3 mm de espesor, como se muestra en la Figura 66.



Gama perfil tubular - redondo

DIÁMETRO EXTERIOR ESPECÍFICO	ESPESOR ESPECÍFICO	MASA LINEAL	ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL	MOMENTO DE INERCIA	RADIO DE GIRO	MÓDULO ELÁSTICO	MÓDULO PLÁSTICO	MOMENTO DE INERCIA DETORSIÓN	MÓDULO DETORSIÓN	SUPERFICIE LATERAL POR UNIDAD DE LARGO	LARGO NOMINAL POR TONELADA	ÁREA SUPERFICIE EXTERIOR POR METRO
D	T	M	A	I	i	W	W	I _t	C _t	A _s	m	A _{se}
mm	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ³	m ² /m		m ²
50	1,5	1,79	2,29	6,73	1,72	2,69	3,53	13,5	5,38	0,157	557	687
50	2	2,37	3,02	8,70	1,70	3,48	4,61	17,4	6,96	0,157	422	521
50	2,3	2,71	3,45	9,83	1,69	3,93	5,24	19,7	7,86	0,157	370	456
50	2,5	2,93	3,73	10,6	1,68	4,22	5,65	21,1	8,44	0,157	341	421
50	2,9	3,37	4,29	11,9	1,67	4,78	6,44	23,9	9,56	0,157	297	366
50	3	3,48	4,43	12,3	1,67	4,91	6,64	24,6	9,82	0,157	288	355
50	3,2	3,69	4,70	12,9	1,66	5,18	7,02	25,9	10,4	0,157	271	334
50	3,6	4,12	5,25	14,2	1,65	5,68	7,77	28,4	11,4	0,157	243	299
50	4	4,54	5,78	15,4	1,63	6,16	8,49	30,8	12,3	0,157	220	272
50	5	5,55	7,07	18,1	1,60	7,25	10,2	36,2	14,5	0,157	180	222
50	6	6,51	8,29	20,4	1,57	8,18	11,7	40,9	16,4	0,157	154	189
50	6,3	6,79	8,65	21,1	1,56	8,43	12,1	42,2	16,9	0,157	147	182

Fig. 66. Tabla de perfil tipo tubo redondo. Fuente: [26]

$$I = 9.83 \text{ cm}^4$$

Con los datos obtenidos del Momento de inercia y Momento flector, se procede a calcular el Esfuerzo de trabajo.

$$\sigma_{tra} = \frac{M \times c}{I} \quad [16]$$

$$c = \frac{D}{2} \quad [16] (20)$$

c = Centroide en el eje X e Y de la sección.

D = Diámetro exterior de la sección.

$$\sigma_{tra} = \frac{53.1 \text{ N} \cdot \text{m} \times 0.025 \text{ m}}{0.0000000983 \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{tra} = 14 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{tra} \leq \sigma_{per}$$

$$14 \text{ MPa} \leq 103 \text{ Mpa}$$

Como se puede observar el Esfuerzo de Trabajo es menor que el Esfuerzo permisible concluyendo que el perfil seleccionado está trabajando dentro del rango permitido.

El perfil seleccionado para la construcción del trípode es un perfil redondo con las siguientes dimensiones: 50 mm de diámetro X 2.3 mm de espesor de acero inoxidable 304 ya que trabajará a la intemperie y se necesita que tenga alta resistencia a la corrosión.

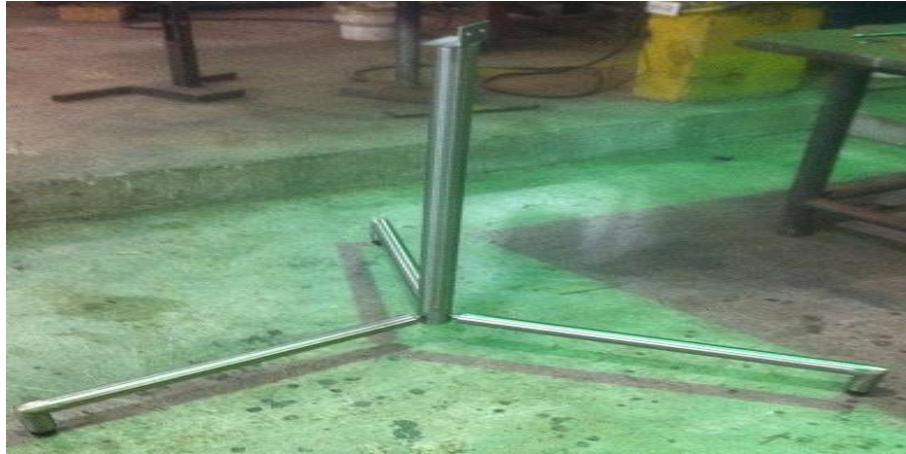


Fig. 67. Columna base tipo trípode. Elaborado por: Robinson Tapia

3.8. Selección del rodamiento giro rotacional, plano (X-Y)

Ahora que ya se conoce las fuerzas axiales que actúan en el mecanismo se puede hacer la selección del rodamiento que se utilizará para el giro rotacional en el plano (X-Y) del sistema, partimos del diámetro del eje que se va a utilizar que es de 16 mm de diámetro.

Se utilizará un rodamiento cónico desmontable, debido a que las cargas que soportará son axiales; los componentes desmontables son intercambiables esto facilita el montaje y desmontaje, así como las inspecciones rutinarias de mantenimiento, en la Figura 68. se indica las partes de este tipo de rodamiento.

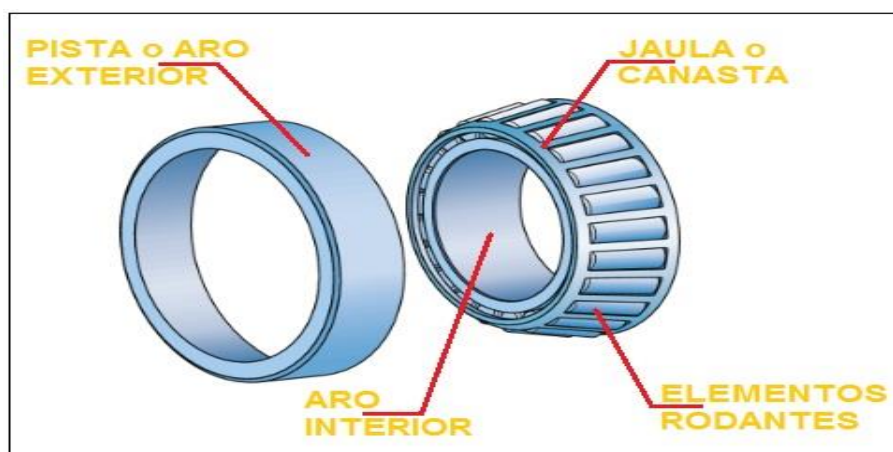


Fig. 68. Partes de un rodamiento cónico. Elaborado por: Robinson Tapia

La carga que debe soportar este rodamiento es la suma total de las fuerzas que intervienen el sistema:

- Fuerza que genera el peso del panel $FV = 78.4 \text{ N}$
- Fuerza que genera el peso de la estructura = 98 N
- Fuerza producida por el mantenimiento = 191 N
- Porcentaje (10%) de fuerza producida por elementos de sujeción = 37 N
- Fuerza total: **404.4 N**

Con este dato se selecciona el rodamiento en la tabla NTN-SNR.

Tabla de dimensiones en pulgadas												
Diámetro Interior (d)	Denominación NTN	Diámetro exterior	Ancho del anillo interior	Ancho del anillo exterior	Ancho total	Radio máximo de unión con el eje	Radio máximo de unión con el alojamiento	Peso	Capacidad de carga dinámica C	Capacidad de carga estática CO	Velocidad límite LUB grasa	Velocidad límite LUB aceite
		(D)	(B)	(C)	(T)	(r _{as} max)	(r _{ah} max)	kg	kN		r.p.m.	
mm		mm										
11,986	4T-A2047/A2126	31,991	10,785	7,938	10,008	0,8	1,3	0,050	10,80	9,45	13000	18000
12,700	4T-A4050/A4138	34,988	10,988	8,730	10,998	1,3	1,3	0,053	12,30	11,60	12000	16000
14,989	4T-A4059/A4138	34,989	10,988	8,730	10,998	0,8	1,3	0,050	12,30	11,60	12000	16000
	4T-L21549/L21511	34,989	10,9	8,712	10,998	1,3	1,3	0,050	14,00	13,70	11000	15000
	4T-03062/03162	41,275	14,681	11,112	14,288	1,3	2,0	0,092	20,30	18,70	10000	13000
15,875	4T-11590/11520	42,862	14,288	9,525	14,288	1,5	1,5	0,103	17,60	17,50	8700	12000

Fig. 69. Tabla de rodamientos cónicos. Fuente: [28]

Las características del rodamiento cónico seleccionado son:

- Denominación NTN = 4T-L21549
- Diámetro interior = 16 mm
- Diámetro exterior = 35 mm
- Capacidad de carga dinámica $C = 14 \text{ kN}$
- Capacidad de carga estática $CO = 13.70 \text{ kN}$

3.9. Diseño de transmisiones

El mecanismo de transmisión debe tener un movimiento continuo, así se facilitará el diseño del control electrónico, contando que el sistema buscará la mayor cantidad de luz durante el día para realizar su posicionamiento, se tiene como datos: que el sol sale aproximadamente a las 06:20 de la mañana, el sistema en ese momento se

posicionara donde detecte la mayor cantidad de luz, así mismo, sabemos que el sol se oculta a las 18:00 de la tarde, por lo que se tiene luz solar durante 12 horas aproximadamente.

El seguidor presentará cambios en su posición solo durante las 12 horas de cada día, debido a que en la noche existe muy poca variación de luz.

Ahora bien, si en 24 horas la tierra gira una vuelta, también se puede expresar en 360° , entonces en 12 horas va a girar 180° , por lo que éste será el recorrido que debe realizar el eje de salida del motor reductor en 12 horas, en la realidad el prototipo de seguidor solar se moverá en los dos ejes que son: El eje de altitud o Cenital y el eje Azimutal, esto con el fin de posicionarse en donde haya mayor cantidad de luz.

Con lo anteriormente expuesto, se calcula en cuántos grados cambian la posición de la tierra con respecto al sol.

$$X = \frac{180^\circ}{12 \text{ h}}$$

$$X = \frac{15^\circ}{h}$$

Ya con este valor se debe tomar en cuenta que el mecanismo a utilizar debe proporcionar al sistema una velocidad muy baja.

Como ya se indicó anteriormente en el capítulo I, algunos tipos de motores de corriente continua, entonces con esta información se buscan el que más se ajuste a la necesidad.

Pues bien, del análisis realizado se sabe que se necesita baja velocidad, ya que el sistema estará en equilibrio el torque no es crítico y además, se conoce que la fuente de alimentación es una batería de 12 Vcc, los motor reductores de corriente continua ofrecen estas ventajas.



Fig. 70. Motor reductor de 12Vcc. Fuente: [13]

A continuación se detallan las características de este motor reductor:

- Motor DC
- Velocidad 3300 rpm
- Voltaje 12V DC
- Potencia 4.3 W
- Caja reductora: Aluminio
- Tren de engranajes rectos de ejes paralelos
- Este motor reductor es de marca Kelvin, procedencia española

Con el dato de la velocidad de entrada que se indica en la placa, se procede a encontrar la velocidad de salida del motor reductor, en la Figura 71, se indica la distribución de los engranes.

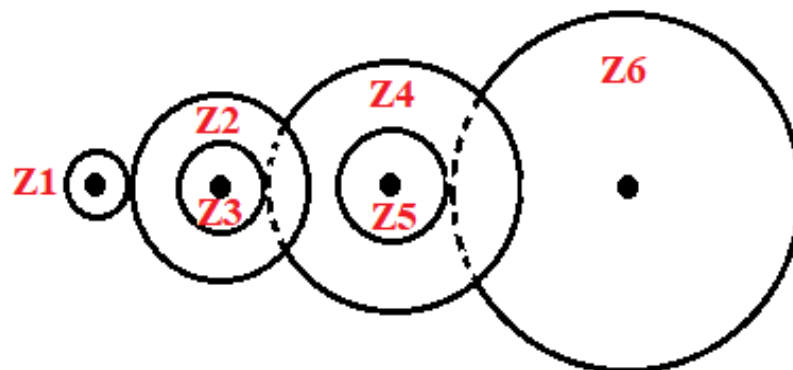


Fig. 71. Gráfico de engranes. Elaborado por: Robinson Tapia

Tabla 13
Tren de engranajes de ejes paralelos

ENGRANAJES CONDUCTORES		ENGRANAJES CONDUCIDOS	
Conductor 1:	$Z_1 = 9$	Conducido 2:	$Z_2 = 56$
Conductor 3:	$Z_3 = 12$	Conducido 4:	$Z_4 = 54$
Conductor 5:	$Z_5 = 11$	Conducido 6:	$Z_6 = 54$

Elaborado por: Robinson Tapia

En la Figura 72, se muestra el tren de engranajes y se puede identificar cuáles son los engranajes conducidos y cuáles son los engranajes conductores.

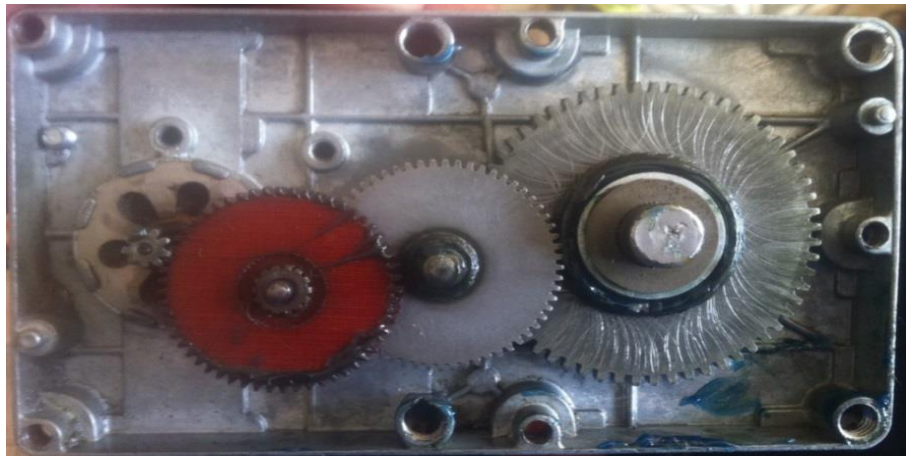


Fig. 72. Tren de engranajes de ejes paralelos. Elaborado por: Robinson Tapia

Para calcular la velocidad de la primera transmisión, se aplica la siguiente fórmula de relación de velocidades en trenes de engranajes [15, pp. 324-325].

$$N_1 \times Z_1 = N_2 \times Z_2 \quad (3)$$

$$3300 \text{ rpm} \times 9 \text{ d} = N_2 \times 56 \text{ d}$$

$$N_2 = N_3 = 530 \text{ rpm (Comparten el mismo eje)}$$

$$N_3 \times Z_3 = N_4 \times Z_4$$

$$530 \text{ rpm} \times 12 \text{ d} = N_4 \times 54 \text{ d}$$

$$N_4 = N_5 = 118 \text{ rpm (Comparten el mismo eje)}$$

$$N_5 \times Z_5 = N_6 \times Z_6$$

$$118 \text{ rpm} \times 11 \text{ d} = N_6 \times 54 \text{ d}$$

$$N_6 = 24 \text{ rpm}$$

Con esta velocidad el sistema podría trabajar, lo que se tendría que hacer es un control que permita variar la velocidad del motor, pero como ese no es el objetivo, sino al contrario se tiene que bajar de manera mecánica aún más la velocidad, para que el control no sea tan complicado de realizar, por tanto; se procede a implementar un tornillo sin fin a la salida de la caja reductora, este a su vez transmitirá el movimiento a una corona que estará fijada a la base del panel FV, como se indica a continuación.

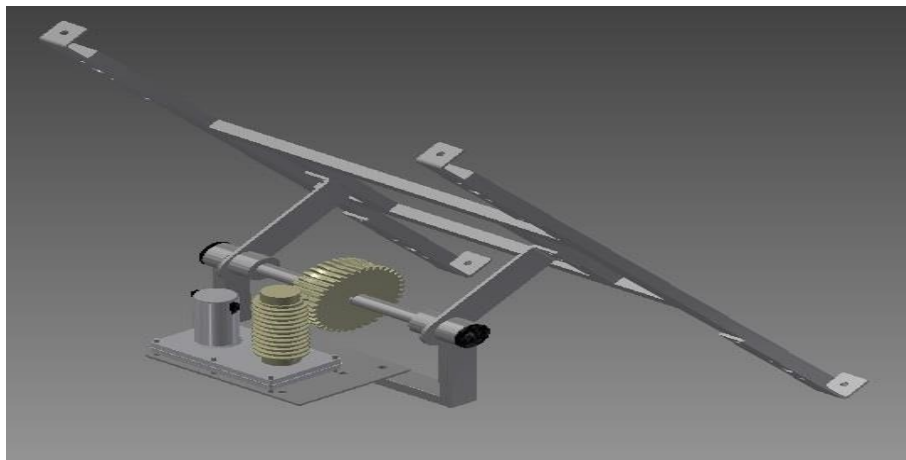


Fig. 73. Transmisión eje altitud. Elaborado por: Robinson Tapia

Ahora se procede a calcular la velocidad final a la que se mueve el panel FV.

Datos del tornillo sinfín:

- $Z1 = 1d$
- Paso = 7 mm
- Entradas $e = 1$
- Diámetro mayor = 40 mm
- Diámetro primitivo = 34 mm
- Diámetro interior = 29 mm

Datos de la corona:

- $Z2 = 38d$

- Diámetro exterior = 90 mm
- Diámetro medio = 87 mm
- Diámetro interior = 85 mm

Sí la velocidad de salida del motor reductor = 24 rpm, en esta transmisión es la velocidad de entrada, entonces:

$$N_1 \times Z_1 = N_2 \times Z_2 \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{N_1 \times Z_1}{Z_2}$$

$$N_2 = \frac{1 \text{ d} \times 24 \text{ rpm}}{38 \text{ d}}$$

$$N_2 = 0.63 \text{ rpm}$$

La velocidad a la que va a girar la corona es de 0.63 rpm, como se puede observar es relativamente baja, permitiendo un correcto seguimiento de la luz y también facilita el control de los actuadores.

Con el resultado antes obtenido, se calcula los grados que se mueve el panel por segundo, de la siguiente forma:

$$\frac{0.63 \text{ rev}}{1 \text{ min}} \times \frac{360^\circ}{1 \text{ rev}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \frac{3.78^\circ}{\text{s}}$$

Este resultado muestra, que el movimiento que tendrá el panel será relativamente lento.

La relación de velocidad y la relación de transmisión en este sistema será la siguiente:

$$i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{e_1}{Z_2} \quad (2)$$

Donde

e_1 = Número de entradas del tornillo sin fin

$$i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{0.63 \text{ rpm}}{24 \text{ rpm}} = 0.026$$

$$i = \frac{e_1}{Z_2} = \frac{1}{38} = 0.026$$

Comprobando con este resultado que se tiene un gran reductor de velocidad y también se garantiza que el sistema no se revertirá aunque los motores estén sin energía, la transmisión de tornillo sinfín y corona se muestra en la Figura 74.

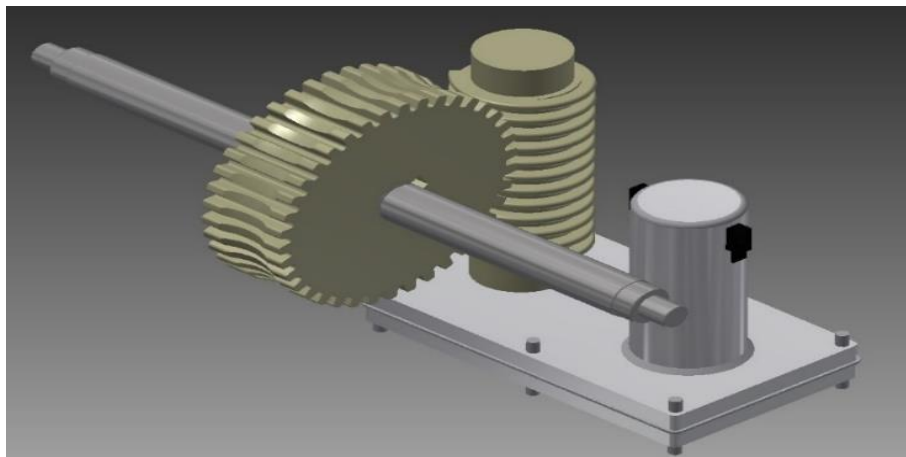


Fig. 74. Transmisión de tornillo sinfín y corona. Elaborado por: Robinson Tapia

Se procede a realizar la simulación de la transmisión utilizando el software Autodesk Inventor para la comprobación de sus partes.

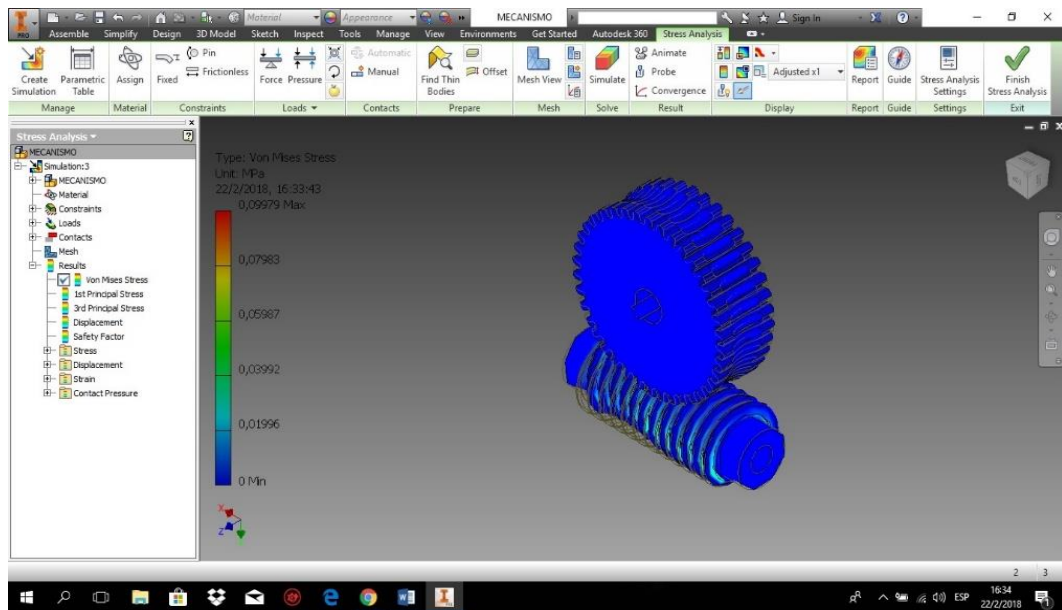


Fig. 75. Tensión de Von Mises. Elaborado por: Robinson Tapia

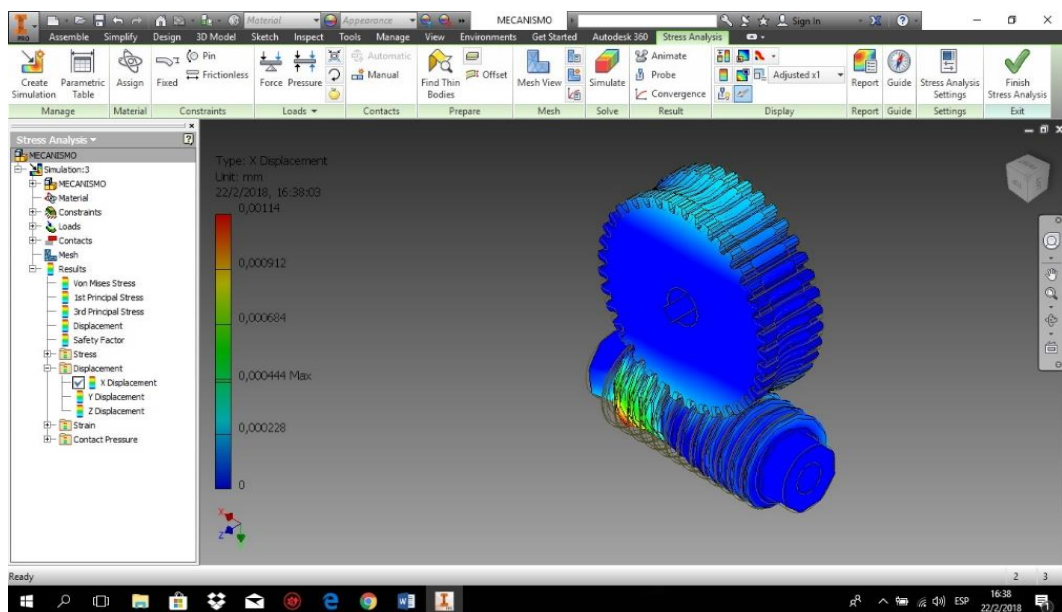


Fig. 76. Desplazamiento en el eje X. Elaborado por: Robinson Tapia

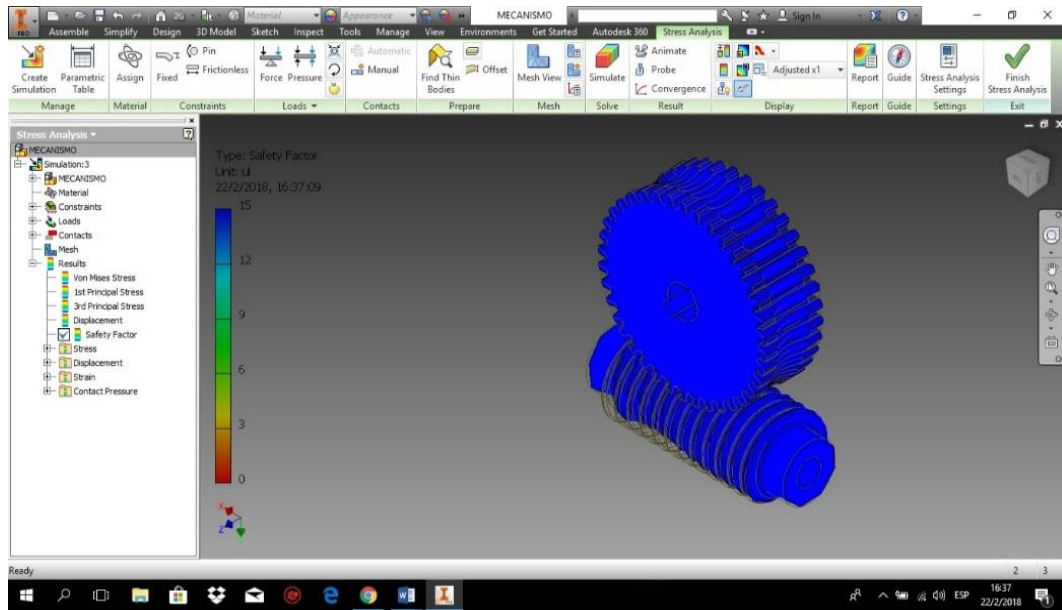


Fig. 77. Factor de seguridad. Elaborado por: Robinson Tapia

3.10. Control del movimiento

Para iniciar el desarrollo del control del prototipo es necesario tener en cuenta que el sistema tendrá movimiento en los dos ejes, tanto el azimutal como el cenital, esto quiere decir que tiene dos grados de libertad. El par giratorio utilizado en este proyecto es una articulación de pasador, esta solo permite un movimiento que es el de rotación entre dos eslabones, por lo que el movimiento queda definido únicamente por un ángulo de rotación. Como se indica en la Figura 78.

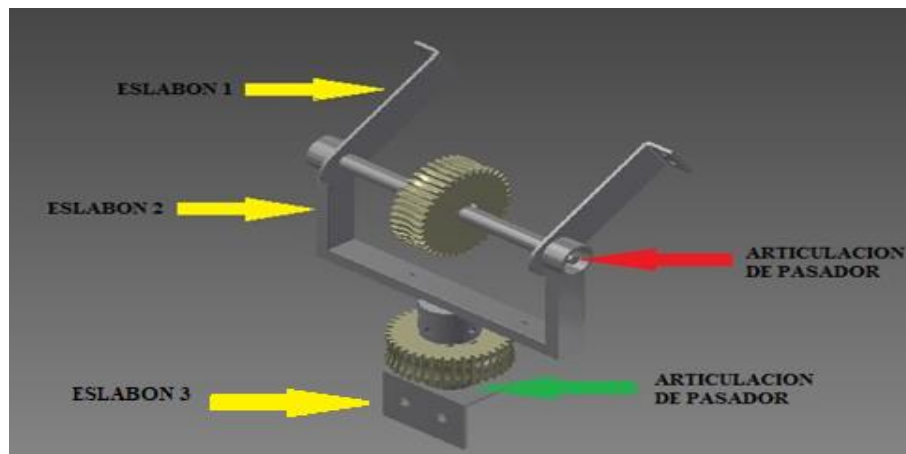


Fig. 78. Par giratorio (articulación de pasador). Elaborado por: Robinson Tapia

Se realiza el cálculo de los grados de libertad que posee este sistema, el número de elementos y el número de pares binarios de un grado de libertad [20] se muestra en la Figura 79.

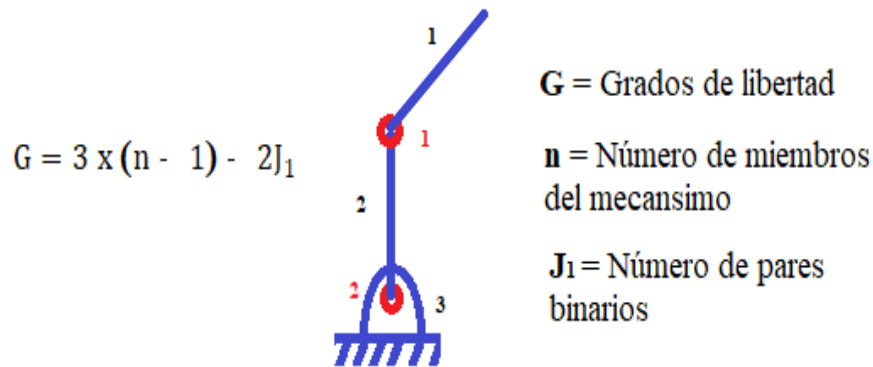


Fig. 79. Grados de libertad del mecanismo. Elaborado por: Robinson Tapia

$$G = 3 \times (n - 1) - 2 \times J_1 \quad [20, p. 13] \quad (21)$$

$$G = 3 \times (3 - 1) - 2 \times 2$$

$$G = 2 \text{ grados de libertad}$$

3.10.1. Instalación y conexión del seguidor solar

Para la obtención de las variables o datos se usaron sensores LDR, los mismos que están colocados en cada extremo del panel fotovoltaico.

El módulo controla cuatro etapas que son:

- Recepción de las señales emitidas por los sensores LDR
- Procesamiento de la señal mediante el micro controlador Arduino
- Etapa de control
- Etapa de potencia

La variación de la resistencia en estos sensores es captada por un micro controlador, el cual mediante un algoritmo hecho en lenguaje C, hace una comparación de las mediciones obtenidas, determina un promedio en un rango establecido y procede a dar la orden a los actuadores para mover el sistema al lugar donde se encuentre la

mayor cantidad de luz, estabilizando las señales y parando los motores. En la Figura 80. se muestra el circuito de control realizado en este proyecto.

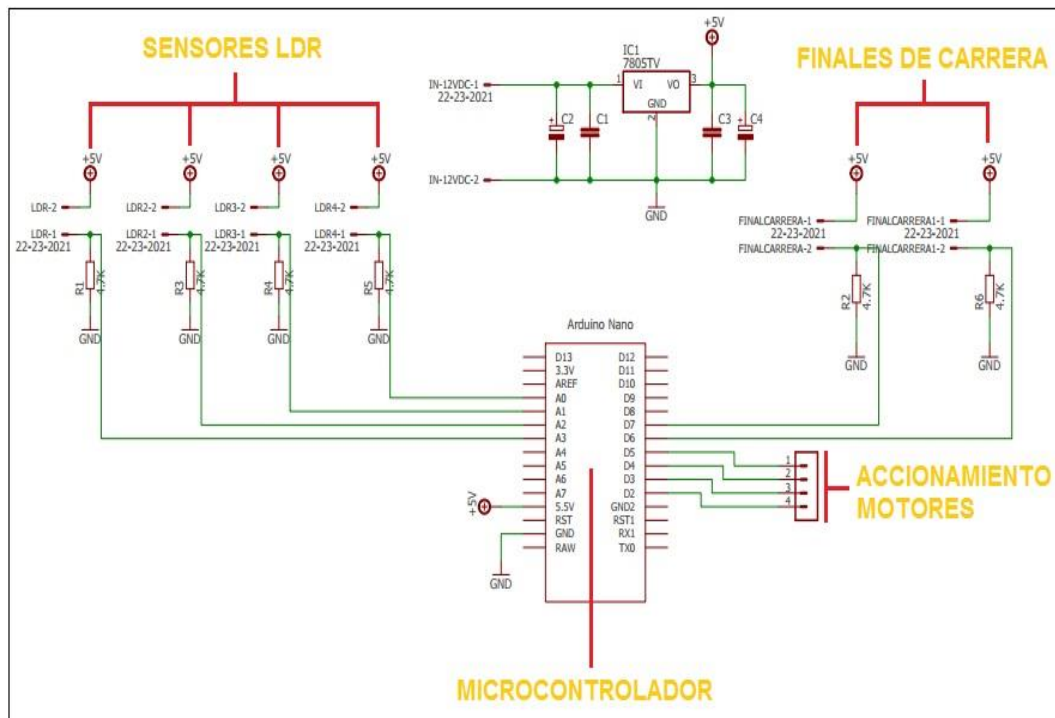


Fig. 80. Circuito de Control. Elaborado por: Ing. Alfredo Romero

La etapa de potencia está formada por dos motor reductores de 12 V de corriente continua, con una potencia de 4,3 W. Cuya función es posicionar el panel fotovoltaico en donde exista mayor cantidad de luz según se defina en la etapa de control. Estos actuadores están conectados a un módulo de potencia que se indica a continuación.

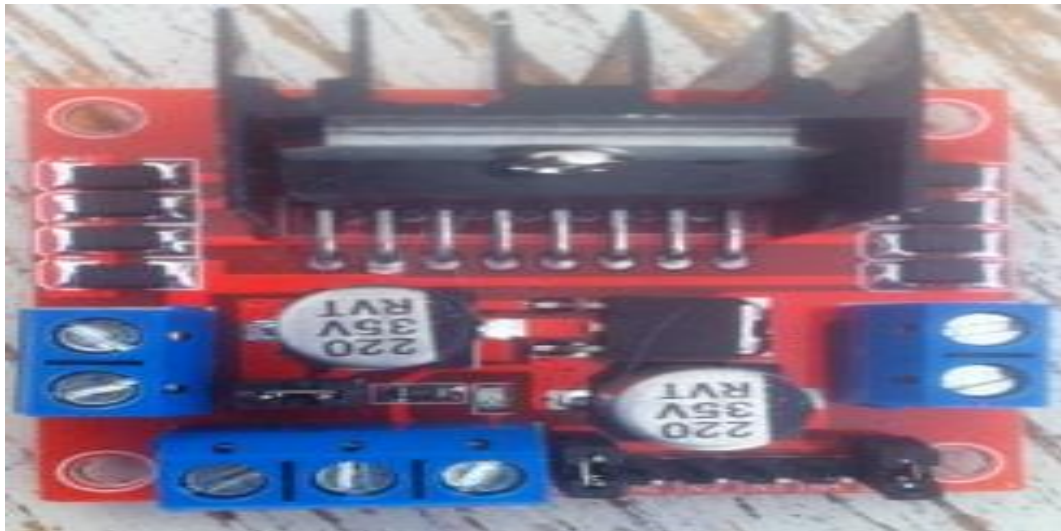


Fig. 81. Módulo de potencia. Elaborado por: Ing. Alfredo Romero

En la etapa de control están conectados los sensores LDR, los paros, los motores y el micro controlador con su código ya programado, a continuación se indica la tarjeta electrónica que contiene estos elementos.

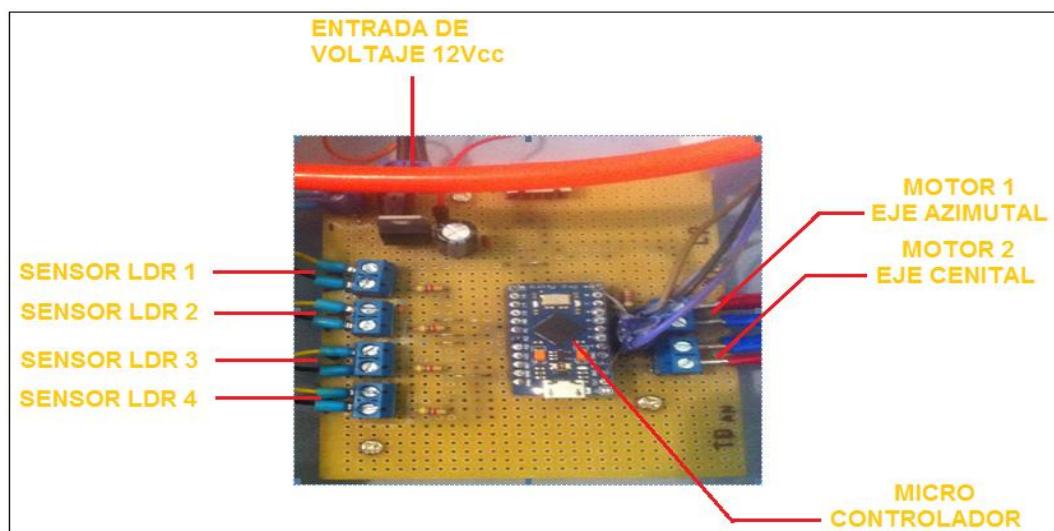


Fig. 82. Módulo de control. Elaborado por: Ing. Alfredo Romero

Todo este sistema de control está ubicado en un tablero el mismo que se encuentra empotrado al panel fotovoltaico, evitando que los cables que llegan a este cuelguen por todo el mecanismo, como se muestra en la Figura 83.



Fig. 83. Instalación de sistema de control. Elaborado por: Robinson Tapia

3.11. Costos

El prototipo tiene una inversión de 3239,00 dólares. La generación de energía eléctrica que entrega el panel fotovoltaico es de 100W, puesto que en Quito tenemos un promedio de 12h de sol, se tiene entonces una potencia total al día de:

$$P_T = 100 \text{ W} \times 12 \text{ h}$$

$$P_T = 1.2 \text{ KWh}$$

Si el costo del KWh en Ecuador es de 0,0933 centavos de dólar se tiene un consumo diario de:

$$P_{\text{diario}} = 1.2 \text{ KWh} \times 0.0933 \text{ cent}$$

$$P_{\text{diario}} = 0.111 \text{ cent}$$

Este valor se multiplica por 30 días del mes, se tiene:

$$P_{\text{mes}} = 0.111 \text{ cent} \times 30$$

$$P_{\text{mes}} = 3.33 \text{ dólares}$$

El prototipo de seguidor solar se construyó en acero inoxidable, ya que va a estar expuesto a cambios climáticos durante su funcionamiento, por esta razón se buscó e implementó materiales que sean resistentes a la corrosión.

En la construcción de este prototipo también se hizo uso de maquinaria como: torno, fresadora, taladro de pedestal, soldadura y herramienta de mano en general, algunas de las partes del prototipo fueron compradas directamente como son: motor reductores, panel fotovoltaico de 100 W, regulador de voltaje, batería. A continuación se detallan los costos de cada una de las partes del prototipo.

Tabla 14
Costos del proyecto

DESCRIPCION	CANTIDAD	HORAS	COSTO
Diseño	Global	120	\$ 800.00
Panel fotovoltaico de 100W	1	-	\$ 490.00
Regulador 12V-24V-10A	1	-	\$ 150.00
Batería de 12V	1	-	\$ 189.00
Motor reductor de 12Vcc	2	-	\$ 180.00
Módulo de control y sensores	Global	30	\$ 400.00
Mecanizado de piezas	Global	35	\$ 350.00
Estructura del seguidor	1	80	\$ 480.00
Varios (movilización, alimentación)	Global	-	\$ 200.00
TOTAL			\$ 3239.00

Elaborado por: Robinson Tapia

Para el mecanizado de las piezas se hizo uso de torno, el costo del alquiler de esta máquina fue de \$10 por cada hora, el proceso de fabricación se agilitó gracias a los planos que anteriormente fueron elaborados, en los que constaban las medidas, sus respectivas tolerancias y acabados.

Las partes como el panel, regulador, batería, sensores, motor reductores, fueron adquiridas directamente del almacén.

Ahora bien, si la inversión fue de 3239,00 dólares, este valor se divide para el consumo de energía que se dejaría de pagar cada mes, con la utilización del sistema de seguimiento solar con lo que se tiene el tiempo de recuperación del capital invertido.

$$\text{Tiempo} = \frac{3239 \text{ dólares}}{3.33 \frac{\text{dólares}}{\text{mes}}}$$

$$\text{Tiempo} = 973 \text{ meses}$$

$$\text{Tiempo} = \frac{973 \text{ meses}}{12 \frac{\text{meses}}{\text{año}}}$$

$$\text{Tiempo} = 81 \text{ años}$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Pruebas

Una vez realizado el diseño y posteriormente construido el prototipo de seguidor solar, se realizaron las pruebas de funcionamiento, las mismas que fueron ejecutadas en el sector de la Kennedy al norte de la ciudad de Quito.

La puesta en marcha del prototipo fue durante las 06:20 horas del día martes 08 de agosto del 2017 hasta las 19:00 del mismo día, presentando un correcto funcionamiento y seguimiento de la luz, así también el prototipo al estar en una terraza y expuesto a ráfagas de viento, presento buena estabilidad de todas sus partes. De las pruebas realizadas durante todo el día se tomaron los datos de voltaje que se indican a continuación:

Tabla 15
Valores de voltaje entregados por el panel fotovoltaico con seguidor

FECHA	HORA	VOLTAJE (V)	FECHA	HORA	VOLTAJE (V)
08-08-2017	06:20	20,40	08-08-2017	13:00	19,91
08-08-2017	07:00	20,40	08-08-2017	14:00	19,43
08-08-2017	08:00	20,00	08-08-2017	15:00	19,26
08-08-2017	09:00	19,87	08-08-2017	16:00	19,73
08-08-2017	10:00	19,83	08-08-2017	17:00	19,52
08-08-2017	11:00	19,85	08-08-2017	18:00	18,45
08-08-2017	12:00	19,80	08-08-2017	19:00	16,40

Elaborado por: Robinson Tapia

A continuación se realiza una gráfica del voltaje entregado por el panel en movimiento durante el transcurso del día.

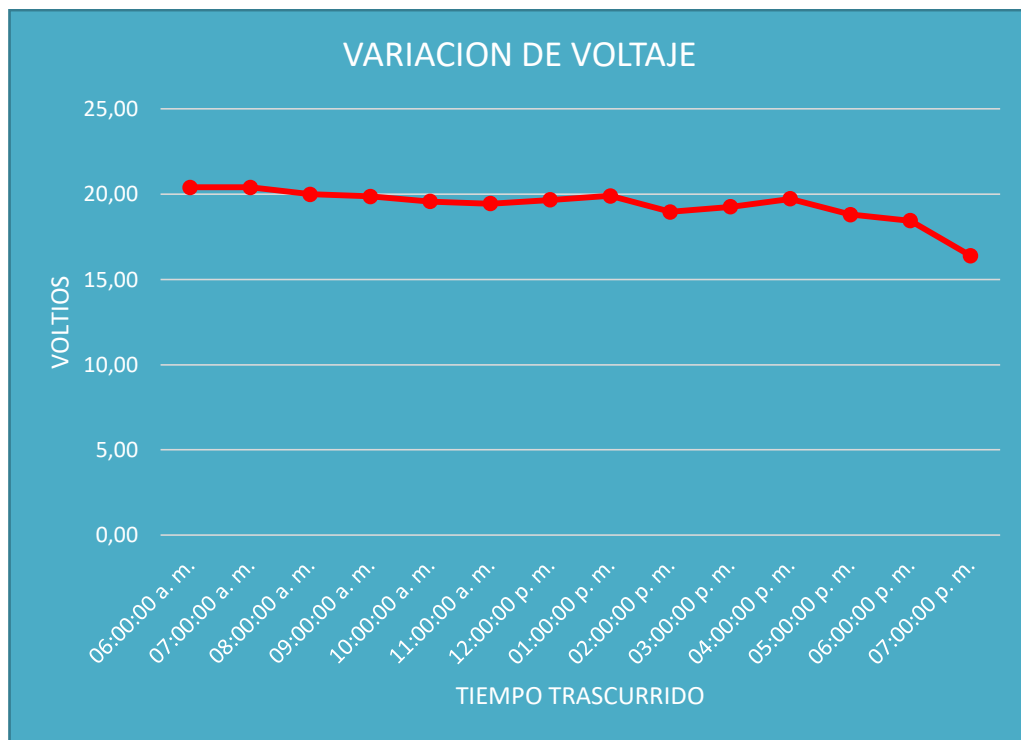


Fig. 84. Variación de voltaje. Elaborado por: Robinson Tapia

En esta gráfica se observa que el voltaje durante el transcurso del día tiene mínimas variaciones y esa pequeña caída de voltaje que se presenta en ciertas horas fue debido a que se presentaron nubosidades, sin embargo el mecanismo ubica al panel fotovoltaico al lugar donde hay mayor cantidad de luz, evitando de esta forma que haya un desperdicio en la captación de la luz.

Para poder realizar una comparación es necesario indicar los datos obtenidos, ubicando al panel en una sola posición respecto al lugar por donde sale el sol, los voltajes entregados por el panel en la prueba realizada durante el día miércoles 09 de agosto del 2017 desde las 06:20 am hasta las 19:00 pm del mismo día fueron los siguientes:

Tabla 16
Valores de voltaje entregados por el panel fotovoltaico fijo a 40° de inclinación

FECHA	HORA	VOLTAJE (V)	FECHA	HORA	VOLTAJE (V)
09-08-2017	06:20	18.50	09-08-2017	13:00	18.34
09-08-2017	07:00	18.45	09-08-2017	14:00	18.27
09-08-2017	08:00	18.40	09-08-2017	15:00	18.10
09-08-2017	09:00	18.35	09-08-2017	16:00	17.33
09-08-2017	10:00	18.20	09-08-2017	17:00	17.11
09-08-2017	11:00	18.38	09-08-2017	18:00	16.67
09-08-2017	12:00	18.25	09-08-2017	19:00	16.40

Elaborado por: Robinson Tapia

A continuación se realiza una gráfica de la curva de voltaje entregado por el panel fijo durante el transcurso del día.

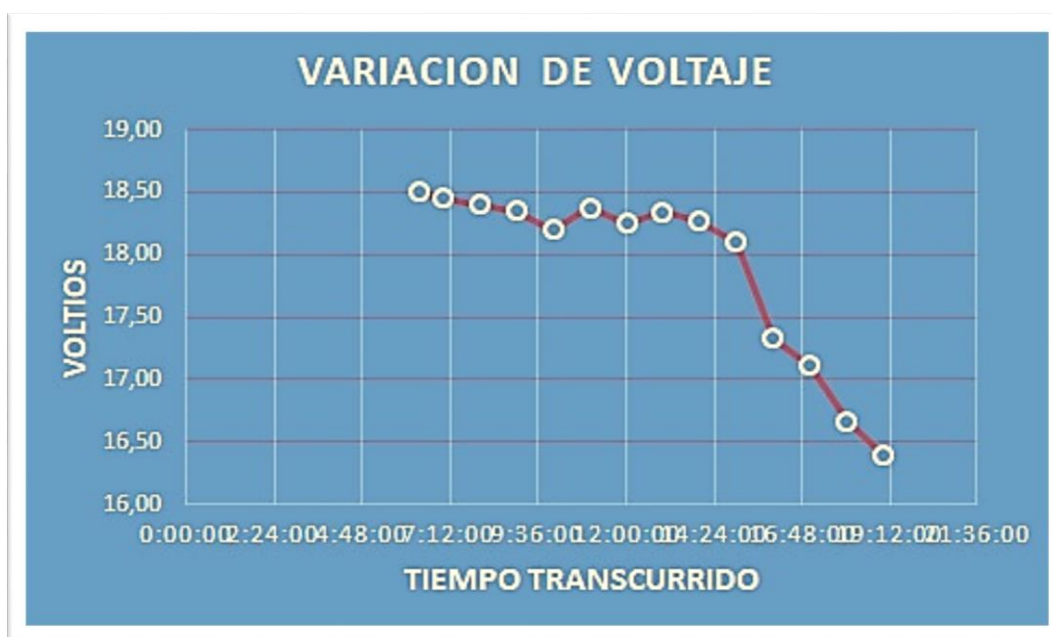


Fig. 85. Variación de Voltaje Panel Fijo. Elaborado por: Robinson Tapia

Con los datos obtenidos se observa que el sistema de seguimiento solar con dos grados de libertad, garantiza que el panel siempre estará expuesto la mayor cantidad de tiempo a la luz, al hacer la comparación de los valores de voltaje obtenidos en las

pruebas, respecto al panel fijo y con sistema de seguimiento, se tiene como resultado que la eficiencia mejora en un 8,77%. Este cálculo se realizó de la siguiente manera:

Tabla 17
Valores de voltaje de panel fijo y con sistema de seguimiento

VOLATJES OBTENIDOS CON SEGUIDOR (Voltios)	VOLTAJES OBTENIDOS CON PANEL FIJO (Voltios)
20,40	18,50
20,40	18,45
20,00	18,40
19,87	18,35
19,83	18,20
19,85	18,38
19,80	18,25
19,91	18,34
19,43	18,27
19,26	18,10
19,73	17,33
19,52	17,11
18,45	16,67
16,40	16,40
TOTAL	250,85

Elaborado por: Robinson Tapia

$$\text{Diferencia} = \left(\frac{\sum \text{Voltajes de panel fijo}}{\sum \text{Volatjes con seguimiento}} \times 100\% \right) - 100\%$$

$$\text{Diferencia} = \left(\frac{272,85 \text{ V}}{250,85 \text{ V}} \times 100\% \right) - 100\%$$

$$\text{Diferencia} = (108,77\%) - 100\%$$

$$\text{Diferencia} = 8,77\%$$

Respecto al cálculo realizado, se puede evidenciar que el sistema de seguimiento mejora la eficiencia del panel al mantenerlo la mayor cantidad de tiempo expuesto a la luz.

La potencia consumida por los motores, para el posicionamiento del panel durante el transcurso del día es:

$$P_{\text{día}} = 4.3 \text{ W} \times 12 \text{ h}$$

$$P_{\text{día}} = 51.6 \text{ Wh}$$

Sí el panel entrega una potencia al día de 1.2 KWh, se procede a calcular el porcentaje de consumo por los motores según la potencia entregada por el panel:

$$P_{\text{día}} = \frac{51.6 \text{ Wh}}{1200 \text{ Wh}}$$

$$\% = 0.043 \times 100$$

4.3 % de consumo de energía por parte del sistema de seguimiento solar.

Se confirma de esta manera que el sistema es funcional y mejora la eficiencia en cuanto a la captación de luz del panel durante el transcurso del día y además es autosustentable.

CONCLUSIONES

Con el sistema de seguimiento solar con dos grados de libertad se consigue mejorar la captación de luz que incide en el panel fotovoltaico optimizando su eficiencia en 8.77%.

Del análisis de la funcionalidad de los medios de transmisión se concluye que los trenes de engranajes, tornillos sinfín y corona utilizados de forma conjunta permiten optimizar el espacio que ocupa el sistema de transmisión así como inmovilizar el panel y condicionar su movimiento únicamente con el accionamiento del motor.

Los requerimientos de funcionalidad en este proyecto fueron importantes a la hora de escoger la mejor alternativa. Estas consideraciones ayudaron a tener una idea clara de las necesidades que tiene el sistema respecto a velocidad, posición de los sensores, material a utilizar, tipos de motores y transmisiones, todo esto llevó a fabricar un prototipo de seguidor solar funcional, los mismos que se implementaron utilizando un módulo de control Arduino.

De las pruebas realizadas con el prototipo de soporte mecánico con dos grados de libertad, se obtuvo un resultado del 8.77% con respecto al mejoramiento en la captación de luz, consiguiendo de esta forma, mejorar la eficiencia del panel fotovoltaico.

Del análisis realizado respecto al costo del sistema de seguimiento que fue de 3239.00 dólares versus la potencia total entregada, se llegó a concluir que la inversión se podrá recuperar a partir de los 81 años.

RECOMENDACIONES

La estructura del proyecto propuesto se recomienda hacerla en otro tipo de material, esto con el fin de abaratar costos.

La utilización de otro tipo de sensores como piranómetros podría mejorar la eficiencia del sistema.

Se puede utilizar este proyecto como base para la implementación de un nuevo módulo de control con mejores prestaciones.

El prototipo elaborado es funcional, sin embargo, se recomienda también cambiar los motorreductores por unos motores paso a paso, motores lineales y comprobar su funcionalidad.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. M. Vicente, Autoconsumo Solar, 1 ed., Madrid: AMV, 2016.
- [2] PROGENSA, La Energía Solar, 5 ed., Sevilla: Artes Gráficas Gala, S.L., 2009.
- [3] J. P. D. Velilla, Sistemas de Energías Renovables, 1 ed., Madrid: AMV, 2015.
- [4] J. M. Jiménez, Energía Solar Fotovoltaica y Energía Eólica, 1 ed., Madrid: AMV, 2014.
- [5] J. R. Vitoria, Necesidades Energéticas, Paraninfo S.A., 2015, p. 272.
- [6] A. Carretero Montero, «Sensores LDR,» de *Electrónica*, Editex, 2009, p. 288.
- [7] O. P. Lamigueiro, Energía Solar Fotovoltaica, Creative Commons, 2010, p. 43.
- [8] M. C. T. Vázquez, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 1 ed., AMV, 2011.
- [9] E. Lorenzo, Ingeniería Fotovoltaica, 1 ed., Madrid: AMV, 2014.
- [10] V. M. Mateo, Gestión del Montaje de Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 1 ed., Madrid: AMV, 2016.
- [11] Organización de Servicios - SEAT, S.A., Sensores y Actuadores, 1 ed., Barcelona: Tecfoto, S.L., 1998.
- [12] J. A. J. Herrera, «"Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para medir potencia solar",» *Revista de Ingeniería*, nº 23, p. 1, Junio 2006.
- [13] J. R. Vitoria, Motores de Corriente Continua, Paraninfo S.A., 2014.
- [14] J. R. Vitoria, Motores de Corriente Continua, Paraninfo S.A., 2014.
- [15] R. L. Mott, «Cinemática de los engranajes,» de *Diseño de elementos de máquinas*, 4 ed., P. M. G. Rosas, Ed., Mexico, Pearson Educación, 2006, pp. 324-325.
- [16] J. E. Shigley, Diseño en ingeniería mecánica, 6 ed., Madrid: McGraw-Hill, 2003.
- [17] A. C. M. C. O. Perpiñán, Diseño de Sistemas Fotovoltaicos, 1 ed., Madrid: AMV, 2012.
- [18] INDURA S.A., Manual de Aceros Inoxidables, Santiago: 2M Impresores Ltda., 2010.
- [19] INEN, «Norma Técnica Ecuatoriana,» 2015. [En línea]. Available:

<https://bit.ly/2kZtUFI>.

- [20] V. Zinoviev, Teoría de los Mecanismos y Máquinas, MIR, 2014.
- [21] A. A. Nieves, Montaje Mecánico en Instalaciones Solares Fotovoltaicas, Vértice, 2011, p. 218.
- [22] R. D. Gerro Prinsloo, Solar Tracking, 1 ed., eBook, 2014, p. 393.
- [23] M. Spiegel, «Manual de formulas,» de *Fórmulas matemáticas*, México, McGraw-Hill, 2015, p. 5.
- [24] NEC, Norma Ecuatoriana de la Construcción, «NEC Cargas (no sismicas),» 2014. [En línea]. Available: <https://online.portoviejo.gob.ec/docs/nec5.pdf>.
- [25] INEN, «Cargas (NO Sismicas),» 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2JCRIc>.
- [26] GRUPO CONDESA, «Tubo Estructural,» 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2rJpPGr>.
- [27] P. Abdul-Hamid Zureick, «Structural Engineering, Mechanics and Materials,» 2011. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2xSXlb>.
- [28] NTN, «Rodamientos Cónicos,» 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2JmYcAL>.

ANEXOS

Anexo 1. Fragmento del programa elaborado en lenguaje C

```
***** DECLARACION DE VARIABLES DE ALCANCE GLOBAL
*****
unsigned int LDR1=0,LDR2=0,LDR3=0,LDR4=0;
unsigned int PINLDR1=A0,PINLDR2=A1,PINLDR3=A2,PINLDR4=A3;
unsigned int
MOTOR1PIN1=2,MOTOR1PIN2=3,MOTOR2PIN1=4,MOTOR2PIN2=5;
const int SWBT=6,SWLR=7;
short a=0;
short FRENARBT=0,FRENARLF=0;
*****
***** CONFIGURACION INICIAL *****
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(15, OUTPUT);

  pinMode(MOTOR1PIN1, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR1PIN2, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR2PIN1, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR2PIN2, OUTPUT);
  pinMode(SWBT, INPUT);
  pinMode(SWLR, INPUT);
  /*while(1)
  MOTOR2(1);
  /*while(1)
  {
    MOTOR1(1);
    delay(500);
    MOTOR1(2);
    delay(500);
    MOTOR2(1);
    delay(500);
    MOTOR2(2);
    delay(500);
  }*/
}
void loop()
{
  LECTSW();
  delay(500); // wait for a second
  digitalWrite(15, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  //delay(10); // wait for a second
  digitalWrite(15, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  //delay(100); // wait for a second
  LDR1 = analogRead(PINLDR1);
  LDR2 = analogRead(PINLDR2);
  LDR3 = analogRead(PINLDR3);
  LDR4 = analogRead(PINLDR4);

  /*LDR1 = map(LDR1,0,1023,0,100);
  LDR2 = map(LDR2,0,1023,0,100);
  LDR3 = map(LDR3,0,1023,0,100);
  LDR4 = map(LDR4,0,1023,0,100);*/
```

Elaborado por: Ing. Alfredo Romero

Anexo 2. Maquinado de piezas



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 3. Corte y unión de tubos



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 4. Unión de piezas torneadas



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 5. Unión de patas a la columna



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 6. Topes de sujeción



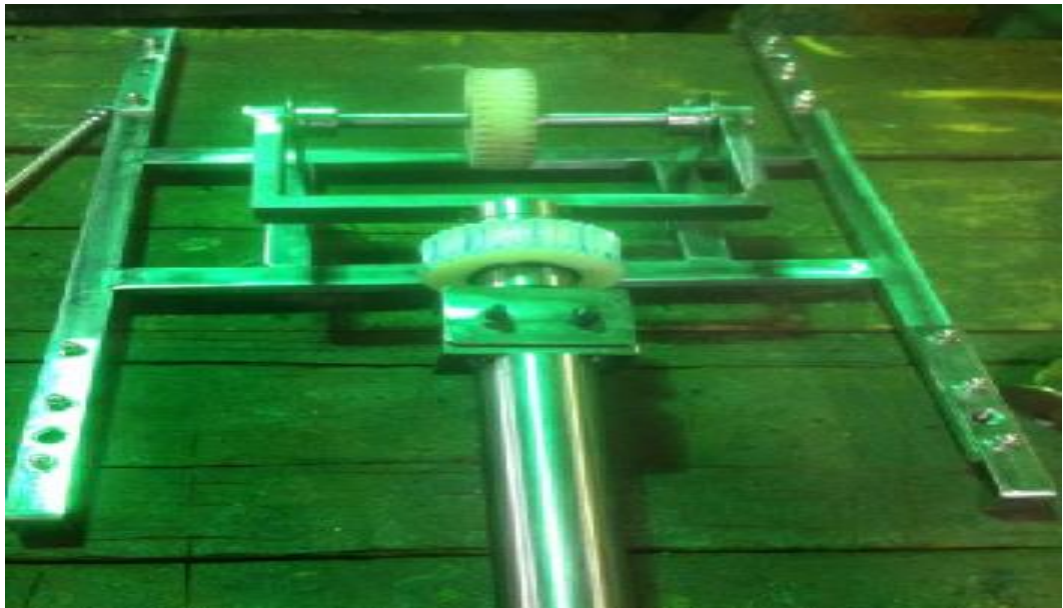
Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 7. Colocación de diagonales de refuerzo



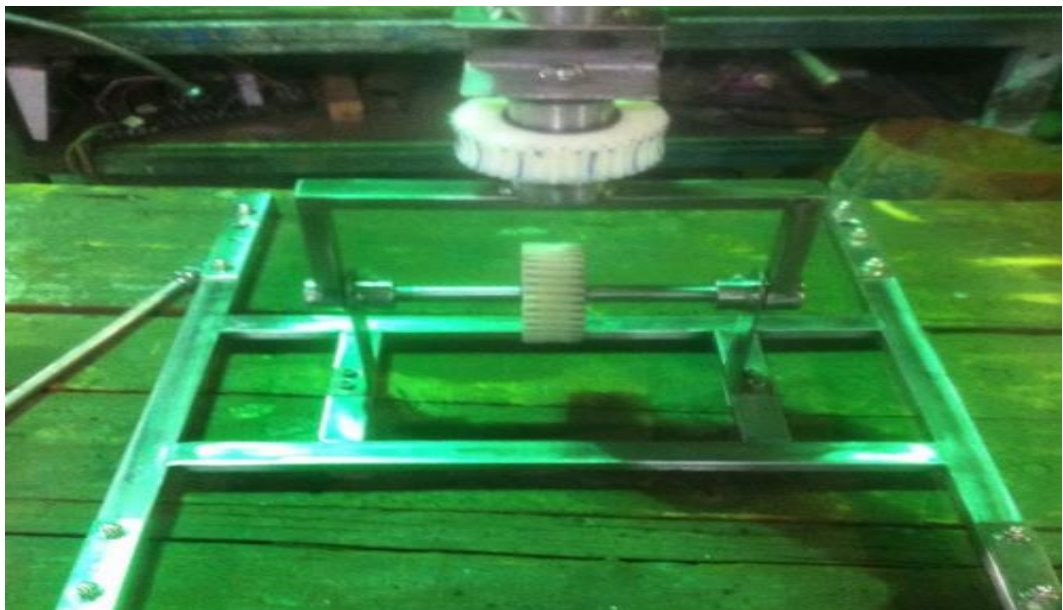
Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 8. Unión de piezas y partes de la base del panel fotovoltaico



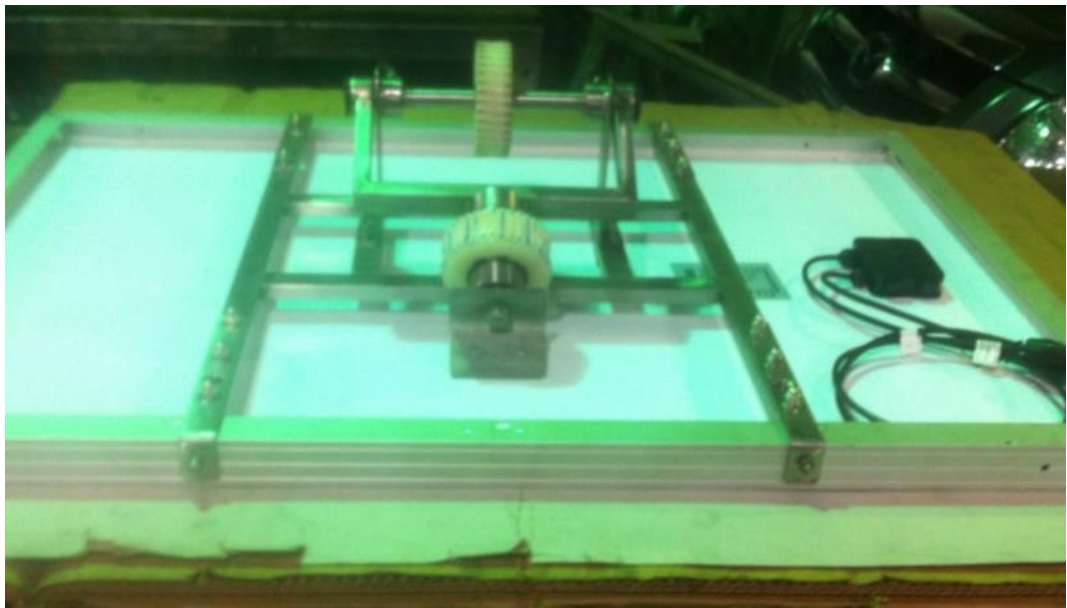
Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 9. Comprobación de movilidad



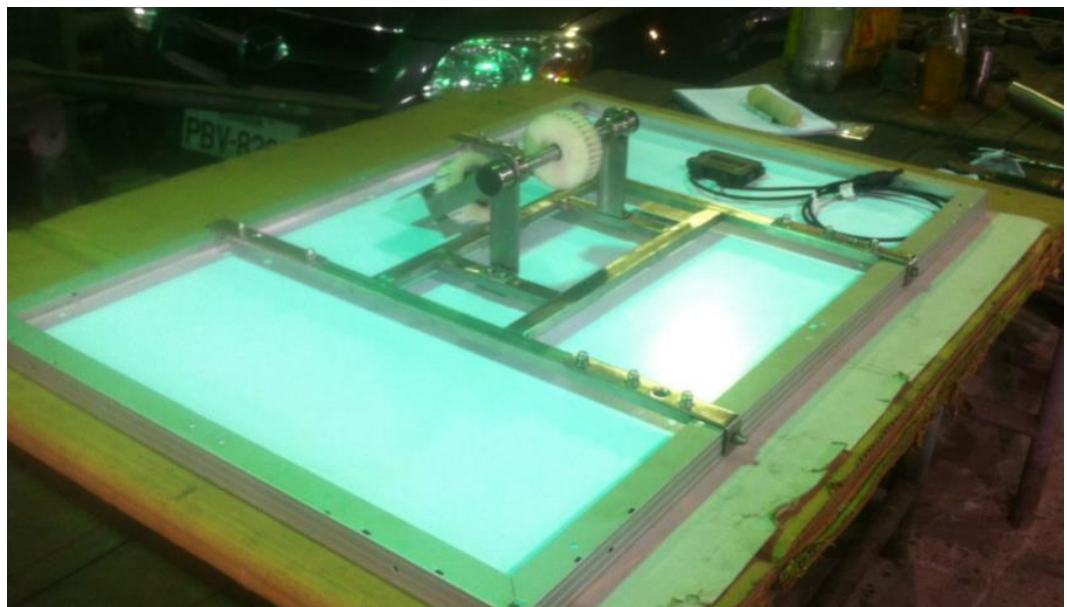
Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 10. Montaje del panel fotovoltaico



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 11. Aseguramiento del panel a la base



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 12. Unión del panel a la columna



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 13. Colocación de contrapesos



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 14. Instalación y montaje del módulo de control y sensores LDR



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 15. Regulación de sensores y comprobación del programa



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 16. Puesta en marcha del seguidor



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 17. Pruebas



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 18. Toma de mediciones



Elaborado por: Robinson Tapia

Anexo 19. Verificación de funcionamiento



Elaborado por: Robinson Tapia